

# ESTUDIO Y OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE RESIDUOS GRASOS DE ORIGEN BOVINO

ANDREA MARITZA VIVAS CASTAÑO

Cod. 1113779915

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA  
ESCUELA DE QUÍMICA  
PROGRAMA DE QUÍMICA INDUSTRIAL  
PEREIRA RISARALDA

2010

ESTUDIO Y OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE RESIDUOS GRASOS DE  
ORIGEN BOVINO

ANDREA MARITZA VIVAS CASTAÑO

Cod. 1113779915

Trabajo de grado para optar el título de Químico Industrial

Director

Juan Pablo Arrubla Vélez

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE TECNOLOGÍA

ESCUELA DE QUÍMICA

PROGRAMA DE QUÍMICA INDUSTRIAL

PEREIRA RISARALDA

2010

Nota de aceptación

---

---

---

---

Presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

Este trabajo está dedicado a mis preciados padres Javier y Matilde y a mi adorada hermana Diana Carolina, quienes han sido mi constante apoyo, el motivo para llegar hasta aquí y son la inspiración para seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer de corazón a mi padre y a mi madre por su apoyo constante y sobre todo por su confianza, también quiero agradecer a mi hermana por su credibilidad y apoyo moral.

A mis compañeros de la carrera que hicieron amena y divertida mi etapa de la universidad.

A los profesores de la universidad por los conocimientos transmitidos y por participar en mi proceso como profesional.

Al laboratorio de oleoquímica por permitir desarrollar mi proyecto de grado, y a los compañeros del laboratorio por su paciencia y colaboración en los momentos necesarios.

A los profesores Juan Pablo Arrubla y Gloria Edith Guerrero por sus asesorías y colaboración, ya que hicieron posible el desarrollo de este proyecto.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	9
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	10
<b>LISTA DE ANEXOS</b>	11
<b>RESUMEN</b>	12
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	14
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	16
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b>	18
<b>4. OBJETIVOS</b>	22
4.1 Objetivo general	22
4.2 Objetivos específicos	22
<b>5. MARCO DE REFERENCIA</b>	23
5.1 MARCO DE ANTECEDENTES	23
5.2 MARCO TEÓRICO	25
5.2.1 Historia del biodiesel	25
5.2.2 Definición de biodiesel	27
5.2.3 Producción mundial de biodiesel	27
5.2.4 Biodiesel en Colombia	29
5.2.5 Materia prima para la producción de biodiesel	30
5.2.6 Obtención de biodiesel	31
5.2.7 Reacciones secundarias	33
5.2.8 Desempeño mecánico del biodiesel	35
5.2.9 Calidad del biodiesel	36
5.2.10 FUNDAMENTO DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LA GRASA	38
5.2.10.1 Humedad	38
5.2.10.2 Cenizas	38
5.2.10.3 Extracto etéreo	38
5.2.10.4 Índice de acidez	39
5.2.10.5 Índice de saponificación	40
5.2.10.6 Índice de yodo	40
5.2.10.7 Índice de peróxido	42
5.2.10.8 Humedad	43
5.2.10.9 Calcio y Magnesio	43
5.2.10.10 Fósforo	44
5.2.10.11 Cloruros	44
5.2.10.12 Sulfuros	45

5.2.10.13 Proteínas	45
5.2.11 FUNDAMENTO DE LOS ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS DEL BIODIESEL	46
5.2.11.1 Densidad	46
5.2.11.2 Índice de refracción	47
5.2.11.3 Viscosidad cinemática	47
5.2.11.4 Punto de inflamación	48
5.2.11.5 Poder calorífico	49
5.2.11.6 Color y apariencia	50
5.2.11.7 Índice de yodo	51
5.2.11.8 Humedad	51
5.2.11.9 Corrosión de la lámina de cobre	52
5.2.12 MÉTODOS INSTRUMENTALES PARA ANÁLISIS CUANTITATIVO	52
5.2.12.1 Cromatografía de gases/Espectrometría de masas (CG/EM)	52
5.2.13 PRUEBAS MECÁNICAS DEL BIODIESEL EN MOTOR DIESEL	53
5.2.14 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	54
5.2.14.1 Promedio	54
5.2.14.2 Desviación estándar	54
5.2.14.3 Coeficiente de variación	55
<b>6. METODOLOGÍA</b>	56
6.1 Muestra de análisis	56
6.1.1 Procedencia	56
6.1.2 Selección	56
6.1.3 Almacenamiento	56
6.2 Análisis de la materia prima	56
6.2.1 Humedad	57
6.2.2 Cenizas	57
6.2.3 Extracto etéreo	57
6.3 Extracción de la grasa	57
6.4 Análisis de la grasa extraída	57
6.4.1 Índice de acidez	57
6.4.2 Índice de saponificación	58
6.4.3 Índice de yodo	58
6.4.4 Índice de peróxido	58
6.4.5 Humedad	58
6.4.6 Calcio y magnesio	58
6.4.7 Fósforo	58
6.4.8 Cloruros	58
6.4.9 Sulfuros	59
6.4.10 Proteínas	59
6.5 Obtención biodiesel	59
6.6 Análisis de los metilésteres obtenidos	60
6.6.1 Métodos físicos	60
6.6.1.1 Densidad	60
6.6.1.2 Índice de refracción	60

6.6.1.3 Viscosidad cinemática	60
6.6.1.4 Punto de inflamación	60
6.6.1.5 Poder calorífico	61
6.6.1.6 Apariencia	61
6.6.1.7 Color	61
6.6.2 Métodos químicos	61
6.6.2.1 Índice de yodo	61
6.6.2.2 Humedad	61
6.6.2.3 Corrosión de la lámina de cobre	61
6.7 Cromatografía de gases para metilesteres	62
6.8 Ensayo del biocombustible en motor diesel	63
<b>7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>65</b>
7.1 Análisis de los residuos grasos	65
7.2 Extracción de la grasa	66
7.3 Análisis físico-químico de la grasa extraída	67
7.4 Análisis de proteínas del residuo de extracción	71
7.5 Obtención de biodiesel	71
7.6 Análisis físico-químico del biodiesel obtenido	74
7.7 Análisis de cromatografía de gases	79
7.7.1 Identificación de los compuestos en el biodiesel	79
7.8 Ensayo del biocombustible en el motor diesel	82
7.8.1 Torque	83
7.8.2 Potencia	85
7.8.3 Consumo específico de combustible	87
7.8.4 Opacidad	90
<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>93</b>
<b>9. RECOMENDACIONES</b>	<b>96</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>98</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>117</b>



## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Proporción (%) ácidos en sebo bovino	31
<b>Tabla 2.</b> Normas para biodiesel como combustible	37
<b>Tabla 3.</b> Interpretación del coeficiente de variación	55
<b>Tabla 4.</b> Condiciones para análisis del biodiesel bovino por CG-EM	62
<b>Tabla 5.</b> Resultados de la caracterización de la materia prima	65
<b>Tabla 6.</b> Resultados de los análisis físico-químicos de la grasa extraída	67
<b>Tabla 7.</b> Resultados de los análisis físico-químicos de la grasa extraída (continuación)	68
<b>Tabla 8.</b> Determinación de proteínas en el residuo de extracción	71
<b>Tabla 9.</b> Resultados de los análisis físico-químicos del biodiesel	74
<b>Tabla 10.</b> Resultados de los análisis físico-químicos del biodiesel (continuación)	75
<b>Tabla 11.</b> Resultados de cromatografía de gases para el biodiesel bovino	80
<b>Tabla 12.</b> Torques mínimos, máximos y registros de torque del fabricante según RPM de los torques máximos y mínimos de DIESEL 1 y 2 y BIODIESEL 1 y 2	83
<b>Tabla 13.</b> Potencias mínimas y máximas y registros de potencia del fabricante según RPM de las potencias máximos y mínimos del DIESEL 1 y 2 y BIODIESEL 1 y 2	85
<b>Tabla 14.</b> Consumos específicos de combustible mínimos y máximos y registros de consumo específico del fabricante según RPM de los consumos específicos máximos y mínimos del DIESEL 1 y 2 y BIODIESEL 1 y 2	88
<b>Tabla 15.</b> Opacidades máximas y mínimas del DIESEL 1 y 2 y BIODIESEL 1 y 2	90

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Reacción general de transesterificación	31
<b>Figura 2.</b> Reacción de saponificación	34
<b>Figura 3.</b> Reacción de neutralización de ácidos grasos libres	35
<b>Figura 4.</b> Reacción de oxidación de un ácido graso	42
<b>Figura 5.</b> Espectrómetro de absorción atómica	43
<b>Figura 6.</b> Vaso abierto Cleveland	49
<b>Figura 7.</b> Bomba Calorimétrica	50
<b>Figura 8.</b> Láminas patrón para la norma ASTM D130	52
<b>Figura 9.</b> Condiciones de temperatura para análisis del biodiesel bovino por CG-EM	63
<b>Figura 10.</b> Banco de pruebas Diesel	63
<b>Figura 11.</b> Mecanismo de reacción de una transesterificación alcalina	73
<b>Figura 12.</b> TIC obtenido por cromatografía de gases de la muestra de biodiesel bovino	79
<b>Figura 13.</b> Comparación de torques mínimos entre los datos reportados por el fabricante del motor y los resultados de las muestras de diesel y biodiesel-diesel	84
<b>Figura 14.</b> Comparación de torques máximos entre los datos reportados por el fabricante del motor y los resultados de las muestras de diesel y biodiesel-diesel	84
<b>Figura 15.</b> Comparación de potencias mínimas entre los datos reportados por el fabricante del motor y los resultados de las muestras de diesel y biodiesel-diesel	86
<b>Figura 16.</b> Comparación de potencias máximas entre los datos reportados por el fabricante del motor y los resultados de las muestras de diesel y biodiesel-diesel	86
<b>Figura 17.</b> Comparación de consumo específico de combustible mínimos entre los datos reportados por el fabricante del motor y los resultados de las muestras de diesel y biodiesel-diesel	88
<b>Figura 18.</b> Comparación de consumo específico de combustible máximos entre los datos reportados por el fabricante del motor y los resultados de las muestras de diesel y biodiesel-diesel	89
<b>Figura 19.</b> Comparación de opacidades mínimas entre los resultados de las muestras de diesel y biodiesel-diesel	91
<b>Figura 20.</b> . Comparación de opacidades máximas entre los resultados de las muestras de diesel y biodiesel-diesel	91

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo A.</b> Cromatografía de gases estándar RESTEK 35078	117
<b>Anexo B.</b> Resultados de espectrometría de masas para el biodiesel bovino	121
<b>Anexo C.</b> Expresiones para cálculos de pruebas mecánicas en pruebas de motor diesel	123
<b>Anexo D.</b> Procedimiento pruebas mecánicas en motor diesel	125
<b>Anexo E.</b> Especificaciones del motor diesel RY 110	126
<b>Anexo F.</b> Curvas reportadas por el fabricante del motor diesel RY 110	127
<b>Anexo G.</b> Tablas de datos obtenidos durante las pruebas mecánicas en motor diesel	128
<b>Anexo H.</b> Tablas de resultados de las pruebas mecánicas en motor diesel	134

## RESUMEN

Se estudió la obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de carnicerías. Este se obtuvo por medio de una transesterificación alcalina, es decir, por medio de una reacción que consistió en hacer reaccionar la grasa con metanol en una relación 1:6, catalizada por una base (hidróxido de potasio). En este proceso se mantuvieron controladas condiciones tales como temperatura y tiempo.

En el transcurso del proyecto se realizaron análisis químicos y físicos tanto a la materia prima como al producto terminado, esto incluyó un análisis cuantitativo por medio de cromatografía de gases para la grasa y el biodiesel, encontrando como componentes mayoritarios: el palmitato de metilo, estearato de metilo, oleato de metilo y miristato de metilo. Se finalizó con un estudio fundamental, evaluando el desempeño del biodiesel producido en un motor diesel.

Dentro de los análisis que se realizaron a la materia prima, se encontraron diversos factores que según la literatura hacen apto el empleo de grasa bovina para la producción de biodiesel: humedad 39,43%, extracto etéreo 81,42%, índice de acidez 0,880%, índice de saponificación 190,17 mg KOH/g grasa, índice de yodo 87,14 g I<sub>2</sub>/100 g grasa, índice de peróxidos 4,32 meq O<sub>2</sub>/Kg grasa, metales (26,13 mg Ca/Kg, 7,41 mg Mg/Kg, 57,33 mg P/Kg), sulfuros 11,52%.

Se encontró que el residuo de extracción de la grasa tiene un contenido de proteínas de 11,32%, valor que puede ser aprovechado para la alimentación animal.

De las pruebas realizadas al biodiesel producido hay varias propiedades fisicoquímicas que están dentro de las normas que muestran este biodiesel como buena opción: índice de yodo 50,60 g I<sub>2</sub>/100 g, índice de refracción 1,4480, nivel 1 en la corrosión de la lámina de cobre, punto de inflamación 173,67 °C, poder calorífico 36947,4 KJ/Kg, viscosidad cinemática 6,12 mm<sup>2</sup>/s y una buena apariencia y color (L3 ASTM color). También se encontraron

aspectos que no son tan positivos como un contenido de humedad del 0,24%, aunque este no es un problema significativo porque se puede mejorar con un mejor sistema de secado. El problema más desfavorable y por el cual se restringe el uso de biodiesel bovino es la densidad ( $0,8652 \text{ g/cm}^3$  a  $23^\circ\text{C}$ ), ya que la norma (ASTM D4052) exige que este parámetro se debe medir a  $15^\circ\text{C}$ , pero a esta temperatura el metílester se solidifica, por lo cual se recomienda realizar estudios que investiguen el uso de biodiesel en climas cálidos o en mezcla.

Debido a que la muestra de biodiesel fue guardada por largo tiempo antes de realizarse las pruebas mecánicas, estas indicaron resultados poco favorables, ya que se obtuvo una menor potencia y mayor consumo específico de combustible por parte de la mezcla biodiesel – diesel (al 20% en biodiesel) con respecto al diesel puro. Por otro lado en los resultados de torque se encontraron diferencias mínimas entre ambos combustibles; se comprobó que el porcentaje de opacidad es menor si se emplea biodiesel como mezcla.

La mayoría de los aspectos son favorecidos por lo cual el biodiesel bovino es una innovable y atractiva forma de producir energía.

Palabras claves: Residuos grasos, transesterificación, biocombustible, biodiesel.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los distintos países dependen del petróleo y sus productos; la estructura física y la forma de vida de las aglomeraciones periféricas que rodean las grandes ciudades son posibles gracias a un suministro de petróleo relativamente abundante y barato. Sin embargo, en los últimos años ha descendido la disponibilidad mundial de esta materia, y su costo relativo ha aumentado, lo que abarca la probabilidad de que a mediados del siglo XXI el petróleo ya no se use comercialmente de la forma habitual, [1]. Esto sostenido por estudios basados en el análisis de la producción y reservas de petróleo (informe estadístico de energía mundial hecho por Beyond Petroleum), el cual estimó que las reservas durarían unos 40 años si se mantiene el ritmo de extracción actual, [2].

Cabe mencionar que el uso de combustible fósiles fortalece el problema de efecto invernadero, el cual por un aumento en la retención de la radiación terrestre se está originando el calentamiento de la atmósfera y de la superficie terrestre, y también el problema de las lluvias ácidas, que es un problema no solo ambiental sino también de salud pública, [3].

Una solución alternativa es la creación de combustibles limpios como los biocombustibles, entre estos se encuentra el biodiesel, el cual tiene una interesante forma de obtención, ya que consiste un combustible líquido derivado de aceites o grasas de origen vegetal o animal y que además puede usarse con seguridad en motores de ciclo diesel.

El proceso de obtención es una reacción química denominada “transesterificación” que consiste en combinar la grasa con un alcohol ligero, normalmente metanol, y deja como residuo glicerina que puede ser aprovechada por la industria cosmética, entre otras, [4].

Este proyecto pretende estudiar y obtener biodiesel a partir de grasa bovina aprovechando un residuo que actualmente no genera un valor agregado.

La región de Risaralda tiene una alta producción de grasa vacuna (aproximadamente 18'225.000 Kg al mes, [5]), esto permite pensar la unión del sector industria-universidad, por parte de la empresa Ingenieros en Proyectos Agroindustriales Limitada (INPRA Ltda.) que es una empresa que pretende estudiar y aprovechar recursos renovables como residuos de algunas empresas con el fin de encontrar ideas empresariales, con la Universidad Tecnológica de Pereira con el aporte del laboratorio de Oleoquímica apoyando en la investigación y en la sinergia, dándole resultado a este proyecto en cuanto a la obtención de biodiesel a partir de residuos bovinos, y de esta manera contribuir en la solución de problemas de abastecimiento de combustible, económicos, sociales y ambientales vividos en la actualidad.

Para lograr este objetivo se realizan diversos métodos a nivel de laboratorio, con el fin de caracterizar la materia prima y verificar la eficiencia de su uso. Se hace un estudio cuidadoso del biocombustible obtenido, analizando las características químicas y físicas, y de esta forma evaluar la producción de biodiesel por medio de esta fuente. También se evalúa el biodiesel en motores mecánicos en donde se analiza el desempeño mecánico y ambiental de una mezcla diesel-biodiesel comparado con el funcionamiento del diesel puro.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En vista de lo que se vive actualmente con respecto al uso de combustibles fósiles, debido al aumento del costo del petróleo por la reducción del abastecimiento del mismo, se hace necesario realizar estudios que propongan soluciones alternativas de producción de combustibles que favorezcan la economía industrial y la provisión de energía.

A esto se le puede sumar la necesidad de crear combustibles limpios, que no propaguen el problema del efecto invernadero, ya que se ha demostrado que este incremento se debe principalmente a la oxidación de carbono orgánico (producto de la combustión de combustibles fósiles) y la deforestación, esto ha provocado que la concentración de CO<sub>2</sub> actual sea mayor en los últimos 650.000 años, [6].

El biodiesel se puede obtener a partir de aceites vegetales o de grasa animal, por lo que al considerar estos recursos y el problema actual, resulta interesante aprovechar lo que es visto un desperdicio para producir lo que es considerado el “combustible del futuro”, ya que en menos de una década, vehículos y maquinas serán impulsadas por medio de este combustible, [7].

Colombia posee un gran potencial, para construir una gran industria de los biocarburantes. Pero limita su obtención a partir de productos agrícolas, ya que como país tropical presenta suelos aptos para el cultivo, [8]. Por esta razón los estudios se han fundamentado en la obtención de biodiesel a partir de productos agrícolas sin difundir estudios sobre la obtención de biodiesel a partir de residuos grasos, la cual es una alternativa tentativa para la obtención de este producto.

Considerando esto, es conveniente tener en cuenta el contenido graso de una vaca. El peso promedio de una vaca varía entre 400 y 500 Kg, de este peso se puede extraer cerca de 90 kg de sebo, es decir, que entre el 18% y 22,5% de una vaca corresponde a residuos grasos, [9]. Este es un porcentaje apreciable, además de que la carne de res tiene un alto consumo y



que los mataderos que procesan el ganado de la región risaraldense sacrifican aproximadamente 200.000 reses por mes, y que generan como subproducto estas grasas que no resultan consumibles, [5].

El estudio de esta grasa bovina para obtener un biocombustible puede ayudar al progreso industrial y económico de la región y del país, encontrando una alternativa para el abastecimiento de combustible.

La empresa INPRA y la Universidad Tecnológica de Pereira se unieron para el desarrollo de este proyecto, realizando un estudio sobre la producción de biodiesel con la grasa extraída de reses, con el fin de determinar la calidad de esta materia prima y por ende la calidad del biodiesel bovino.

### 3. JUSTIFICACIÓN

Desde que el hombre conoce el uso de combustibles, ha sido dependiente de su uso, ya que éste forma parte importante del diario vivir, tanto como para transportarse, para distribuir alimentos y otros productos, para calefacción, para procesos industriales, es por estos y muchos más motivos que resulta indispensable.

Pero debido al largo tiempo y exceso uso de combustibles está llevando al mundo a un estado crítico, afectando la economía de muchos países y el equilibrio ambiental causado por el calentamiento global. Es por esto que se han estudiado diversos métodos en donde se aprovechan fuentes renovables para la generación de energía, como el viento (energía eólica), la luz solar (energía solar), los ríos y corrientes de agua dulce (energía hidráulica), los mares y océanos (energía mareomotriz), el calor de la tierra (energía geotérmica), las olas (energía undimotriz), la llegada de masas de agua dulce a masas de agua salada (energía azul) y materia orgánica o biomasa para la obtención de bioetanol, biogás o biodiesel, [1].

La generación de energía por medio de biodiesel se caracteriza en que en su proceso de obtención se incluyen tres tipos esenciales de materias primas: aceites vegetales, grasas animales y aceites usados. Siendo un dato interesante porque permite al biodiesel ser un combustible renovable, además de reciclar materias inservibles, [3].

Ante una situación de escasez y encarecimiento de alimentos recomienda el uso de biodiesel de segunda generación (procedente de fuentes no alimentarias). Es decir, se deben considerar como materias primas fuentes poco valiosas tales como: los residuos de aceites y grasas de cocina y las grasas animales recogidas en los supermercados, los mataderos, etc., [10, 11].

Las grasas animales, específicamente el sebo de vaca, recientemente han sido consideradas como materia prima en el proceso de elaboración de biodiesel, ya que resultan ser más

económicas que los aceites nuevos. Por lo tanto, la transformación de las grasas animales en biodiesel presenta beneficios medioambientales y reduce la dependencia de otras materias primas agrícolas convencionales, [12].

Dentro de las propiedades generales del biodiesel se encuentran una serie de ventajas en comparación al diesel fósil, pero la principal razón para su utilización es el hecho de que presenta un impacto ambiental mucho menor que los derivados del petróleo. Al ser obtenido de recursos renovables, produce una ventaja neta en lo que se refiere al ciclo de carbono, no produciendo acumulación del mismo en el ambiente. Cuanto más grande es la proporción de biodiesel en una mezcla con diesel, más grande es la baja de los contaminantes tradicionales. El contenido de azufre ronda las 11 ppm. En un diesel regular, está en 1600 ppm, mientras que para un diesel de bajo azufre en 500 ppm, y para el ultra-bajo azufre es de 50 ppm.

Adicionalmente, el biodiesel presenta una gran lubricidad que extiende la vida útil del motor, no es tóxico, y es fácilmente biodegradable [13].

Dentro de las desventajas del biodiesel se encuentra que las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) aumentan, hasta un 10% cuando se usa biodiesel puro. Este compuesto participa en la creación del smog fotoquímico, pero se puede eliminar de manera eficiente con el uso de un catalizador.

El costo de producción del biodiesel es más alto que el del petróleo diesel si se basa en los precios vistos los últimos años. Depende mucho del precio de las materias primas (en un 80% más o menos) pero la evolución de los precios del petróleo podría hacerlo una alternativa posible a largo plazo.

Producir biodiesel supone extender las zonas y las cantidades de vegetales cultivadas, lo que genera una utilización creciente de fertilizantes y pesticidas. Así, se gana en cuanto a los residuos a la atmósfera pero por otro lado, se echa a la tierra compuestos químicos que

contaminan los suelos. Si se produce biodiesel a partir de residuos grasos o aceites usados puede disminuirse el problema.

El biodiesel puro genera corrosión y es incompatible con algunos plásticos, por lo que se deben cambiar ciertas partes del motor para usarlo. Este combustible tiene problema de fluidez a bajas temperaturas. Tal característica impide su uso en ciertas regiones de clima difícil o la obligación de agregarle aditivos especiales.

La vida útil del biodiesel es inferior a 6 meses por su escasa estabilidad oxidativa, o sea que pierde su capacidad a oxidarse en el proceso de combustión en la cámara del motor. No se puede almacenar durante un tiempo largo y se debe vender rápidamente después de su fabricación [3].

Mundialmente, la provisión y reservas de petróleo se ve perjudicada porque la demanda del petróleo aumenta rápidamente, lo cual causa preocupación ya que la demanda mundial de petróleo aumentó en 2008 en 880.000 barriles diarios respecto a 2007, gracias al incremento de la demanda en China, Oriente Medio y Asia, según el informe publicado por la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), [14].

El problema del petróleo es que se extinguirá prácticamente hacia el 2050 si la población mundial crece hasta 9.000 millones de habitantes como se prevé para esas fechas. Eso, si se siguen estrictamente los planes de control de natalidad, como se está haciendo hoy en día en China o en los países norteafricanos. Pero lo más probable es que no suceda así y que la población crezca a un ritmo mayor. Y si se añade a esto la mayor longevidad en un mundo donde la medicina, junto a la calidad de vida, ha tenido una notable mejora, los expertos hablan de una duración de unos 40 años para el petróleo fluido, [15].

Hablando de Colombia, en los años anteriores el precio del diesel ha sido inferior al de la gasolina, por lo que el país se ha venido “dieselizando”, como consecuencia la máxima producción posible de diesel de Ecopetrol se está acercando a la demanda, lo que significa

que en ausencia de nuevas refinerías de petróleos, el país se vería abocado a importar diesel en los próximos años. El biodiesel evitaría dicha importación con un ahorro significativo de divisas, [16].

En Colombia los aceites y grasas son extraídos principalmente de cuatro productos vegetales: palma africana, soya, semilla de algodón y ajonjolí. El más importante en términos de área, producción y rendimiento es la palma africana. En la actualidad de este cultivo se obtiene aproximadamente el 87% de la producción nacional de aceites y grasas [10, 17]. Por esta misma razón, los estudios sobre biodiesel se limitan a los obtenidos a partir de productos agrícolas, en especial al aceite de palma, [10].

En Colombia a partir de agosto 2009 se vende diesel con un 5% de biodiesel en Bogotá, en los llanos orientales y en el centro del país. El uso de la mezcla en la totalidad del territorio colombiano, posiciona al país como líder en Latinoamérica en el uso de este biodiesel en el parque automotor y además lo ubica como el primero del mundo que utiliza aceite de palma como única materia prima para la producción de biodiesel, [18]. En Colombia se consume cerca de 60.000 barriles/día de diesel para vehículos; y si realmente se utiliza un 5% de biodiesel, esto equivale a 3.000 barriles/día de biodiesel, [19].

En Colombia se han realizado pocos estudios de biodiesel obtenidos de materias primas diferentes a aceites vegetales, por lo que no se han aprovechado las materias primas de segunda generación, [20]. En cuanto a la grasa animal, hasta el momento solo se encuentra un estudio en el país y en éste no se aclara la calidad del uso de las grasas animales como materia prima para la producción de biodiesel, ni se discute la calidad el producto final comparado con lo que exigen las normas y el desempeño en motores, [21]. Esto le da significado a esta investigación, ya que se hace un aporte en el país sobre la calidad del sebo bovino como materia prima, la calidad final y desempeño de un biodiesel fabricado a partir de esta fuente.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo general**

Obtener y estudiar un biocombustible a partir de grasa bovina con el fin de dar valor agregado a este residuo y de esta manera generar un aporte industrial con respecto al uso de esta materia prima.

### **4.2 Objetivos Específicos**

- Aprovechar un residuo para la obtención de un combustible.
- Caracterizar la materia prima con el fin evaluar sus cualidades para la producción de biodiesel.
- Determinar el porcentaje de recuperación de grasa en residuos vacunos.
- Obtener biodiesel empleando una reacción de transesterificación por medio del uso de metanol.
- Analizar las principales características físico-químicas del biodiesel fabricado.
- Estudiar cuantitativamente los metilesteres formados en el biodiesel por medio de cromatografía de gases.
- Realizar ensayos del biodiesel obtenido en motores diesel para evaluar el desempeño en torque, potencia, consumo específico de combustible y opacidad comparado con el diesel comercial.

## **5. MARCO DE REFERENCIA**

### **5.1 MARCO DE ANTECEDENTES**

La producción de biodiesel predominante es a partir de aceites vegetales, quedando en menor proporción la producción a partir de grasas animales. Los países que registran mayor empleo de grasas animales para la producción de biodiesel son: Estados Unidos (más del 90% del biodiesel proviene de aceite de soya) y Australia, [22]. En cuanto a producción de biodiesel en Latinoamérica los países que implementan el uso de grasas animales están Brasil y Argentina, [23]. En general la grasa animal más empleada es el sebo bovino. La aplicación de estas grasas surgió a raíz de la prohibición de su utilización en la producción de piensos, como salida para los mismos como subproducto, [22]. El estudio de esta grasa para la producción de biodiesel se encuentra en estudio en la mayoría de los países (principalmente: España, México, El salvador, Bolivia, Uruguay, Paraguay, Argentina, Brasil), [24, 25].

Investigaciones experimentales muestran que el sebo bovino puede ser fácilmente esterificado, obteniendo una sustancia con propiedades similares a los ésteres de aceites vegetales, [26]. Adicionalmente, se ha comprobado que los metilesteres de sebo bovino y vegetales tienen mejor estabilidad de oxidación que los metilesteres de grasa de cerdo, [27].

Experiencias muestran que la transesterificación alcalina de sebo bovino con metanol produce un biodiesel de alta calidad y también con una buena tasa de conversión. Asimismo, se ha demostrado que las mezclas diesel – biodiesel con niveles altos de la biodiesel de sebo bovino (B5, B10, B20 y B30) tienen propiedades de combustible similares o mejor que el diesel, lo que indica que de una manera se trata de mejorar ciertas propiedades del diesel, [4].

Sin embargo, debido al alto contenido de ácido esteárico y palmítico del sebo bovino, se ha encontrado que el biodiesel proveniente de esta fuente tiene características desfavorables, como el punto de obstrucción del filtro frío y la viscosidad, [28].

Se ha determinado que el biodiesel de sebo de vacuno se puede mezclar con el diesel de petróleo o biodiesel de soya para obtener mejores características en las mezclas de combustible final, estas mezclas son un proceso necesario que maximizan el beneficio de los productos combustibles, [28, 29].

Debido a las mezclas con diesel, el rendimiento del motor a causa de los metilesteres de sebo son comparables con el desempeño del diesel puro. Los metilesteres bovinos y sus mezclas se pueden utilizar sin realizar cambios en un motor diesel de inyección directa. Se ha confirmado que las emisiones de escape de biodiesel y sus mezclas son más bajas que el de combustible diesel puro; sin embargo, la adición de biodiesel al combustible diesel disminuye la eficiencia térmica del motor y aumenta el consumo específico de combustible, debido al inferior poder calorífico del biodiesel en comparación con el diesel, [29].

Para los metilesteres de grasa pollo mezclado con diesel fósil se han realizado análisis que señalan que este tipo de biodiesel puede ser utilizado con confianza en un motor diesel convencional. Los aditivos de magnesio pueden reducir el punto de fluidez, punto de inflamación y la viscosidad del combustible biodiesel, dependiendo de la tasa de aditivo. En pruebas de motores los resultados muestran que el torque en el motor no cambia significativamente con la adición de 10% de biodiesel de pollo, mientras que el consumo específico de combustible aumenta un 5,2%, [30].

Los estudios de metilesteres de grasa de cordero han encontrado resultados que demuestran que el uso de este tipo de grasas es adecuado como materia prima además de que representa un bajo costo para la producción de biodiesel [4].



Los diferentes tipos de biodiesel considerados como estratégicos para Colombia por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural son: palma, higuerilla, jatropha y sachá inchi, los cuales presentan una amplia gama de composiciones químicas y calidades. Sólo recientemente se está trabajando en el aprovechamiento de residuos para producción de biocombustibles, [20].

Entre los residuos que se han estudiado en Colombia están los desechos de aceites de cocina, [31] y también las grasas animales, pero estas últimas han sido poco estudiadas. Entre las grasas animales se han realizado pruebas que implementan la conversión de subproductos avícolas que concluyen con buenos resultados, [32]. Hasta la fecha se encontró un estudio de grasas animales, pero solo para aquellas que tienen altos contenidos de ácidos grasos libres, este fue realizado por medio de dos etapas: inicialmente una transesterificación ácida y posteriormente una transesterificación básica. Este estudio se limitó a la producción y al rendimiento, y concluyen que su producción es satisfactoria, [21], pero no se realiza ninguna discusión sobre la calidad de los metilésteres, no se confronta ante las normas y no se realizan pruebas mecánicas. Por esta razón, este estudio a partir de residuos grasos de origen bovino representa un aporte a nivel regional y nacional.

## **5.2 MARCO TEORICO**

### **5.2.1 Historia del biodiesel**

El biodiesel comenzó en 1853 con los científicos E. Duffy y J. Patrick con la idea de someter a los aceites vegetales a un proceso de transesterificación. Este proceso permitió a los científicos obtener una sustancia cuya viscosidad es inferior a la de su aceite de procedencia, aunque en ese entonces no le encontraron un uso específico, [33].

El concepto de biocombustible se extiende para hace más de 100 años, gracias al ingeniero alemán Rudolph Diesel, quien diseñó el motor diesel para funcionar con aceite vegetal. Fue

diseñado inicialmente y presentado en la feria internacional de 1900 en París como el primer motor para "biocombustible", el ingeniero Diesel usó aceite de maní, [34].

Sin embargo, la viscosidad causante del mal comportamiento de los aceites vegetales especialmente en los motores diesel de inyección directa fue limitante en su utilización. A pesar de esto, los aceites empezaron a usarse en ese tiempo, resultando ser tan importante como el petróleo y el carbón [35]. No obstante, el petróleo irrumpió en el mercado porque era barato, razonablemente eficiente y fácilmente disponible. Uno de sus derivados, el gasóleo, rápidamente se convirtió en el combustible más utilizado en el motor diesel, ya que desde que el ingeniero Diesel murió en 1913, su motor ha sido modificado para correr con el contaminante combustible petrolero, conocido como "diesel", [33].

A pesar del uso generalizado de combustibles derivados de fósiles de petróleo diesel, el interés en los aceites vegetales como combustibles para motores de combustión interna se reportó en varios países durante los años 1920 y 1930 y más tarde durante la Segunda Guerra Mundial. Bélgica, Francia, Italia, el Reino Unido, Portugal, Alemania, Brasil, Argentina, Japón y China probaron y usaron aceites vegetales como combustibles diesel durante este tiempo, [33].

Solo hasta el año de 1970 el biodiesel se desarrolló de forma significativa a raíz de la crisis energética que se sucedía en el momento, y al elevado costo del petróleo.

Las primeras pruebas técnicas con biodiesel se llevaron a cabo en 1982 en Austria y Alemania, pero solo hasta el año de 1985 en Silberberg (Austria), se construyó la primera planta piloto productora de RME (Rapeseed Methyl Ester – metil éster aceite de semilla de colza), [36].

### 5.2.2 Definición de biodiesel

El biodiesel es un biocombustible sintético líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, nuevos o usados. El prefijo *bio* hace referencia a su naturaleza renovable y biológica en contraste con el combustible diesel tradicional derivado del petróleo; mientras que *diesel* se refiere a su uso en motores de este tipo. Como combustible, el biodiesel puede ser usado en forma pura o mezclado con diesel de petróleo, [37, 38].

### 5.2.3 Producción mundial de biodiesel

La producción de biodiesel ha tenido un crecimiento en los últimos años. Entre el 2000 y el 2005, ésta se ha cuadruplicado, mientras que la producción de bioetanol sólo creció al doble y la de petróleo sólo creció un 7%. Sin embargo, aún se está lejos de los niveles de producción mundial de bioetanol, que ya superó los 35 mil millones de litros por año.

La producción mundial de biodiesel supera en la actualidad los 1,5 millones de toneladas por año (fuera de Estados Unidos). Los precios altos del petróleo son una ventaja atractiva, aunque los precios altos del aceite de soja los compensan en parte, [22].

Hoy en día países como Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Malasia y Suecia son pioneros en la producción, ensayo y uso de biodiesel en automóviles. La producción de biodiesel que se alcanzó en Europa es casi 3.5 millones de toneladas en el año 2005, comparado con 1.9 millones en el 2004. Los principales productores y consumidores son los países de La Unión Europea. En Europa, es producido principalmente a partir del aceite de la semilla de canola (también conocida como colza o rapeseed) y el metanol, denominado comercialmente como RME (Rapeseed Methyl Ester), el cual es utilizado en las máquinas como diesel puro o mezclado con diesel de petróleo, en proporciones que van desde un 5% hasta un 20%, generalmente. En Alemania y Austria se usa puro para máximo beneficio ambiental.

Además de la colza, en los últimos años se ha producido biodiesel a partir de soya, girasol y palma, siendo esta última la principal fuente vegetal utilizada en Malasia para la producción de biodiesel, [22, 34].

En Estados Unidos la soja es el principal cultivo energético para la producción de biodiesel. En este existen más de 20 empresas dedicadas a la producción de biodiesel, con una capacidad instalada de producción de 600 millones de litros por año, aunque no toda se destina a biocombustibles. La industria se encuentra en expansión, y existen proyectos para ampliar la capacidad de producción en 757 millones de litros adicionales en el mediano plazo, [39].

En América Latina, los principales productores de agrocombustibles son Brasil y Argentina, [40]. Brasil es el pionero en la implementación del programa de biodiesel a escala comercial. En el 2004 fue autorizada la mezcla de 2% de biodiesel en el diesel convencional, y, según la “Ley del Biodiesel” (Ley 11.097/05), a partir del 2008 este porcentaje de mezcla será obligatorio. Asimismo, a partir del 2013, la mezcla de 5% de biodiesel en el diesel será obligatoria, [22].

Brasil se consolida como un polo de inversiones masivas para producir combustible diesel de semillas oleaginosas, un negocio millonario con mercado cautivo en el décimo consumidor de energía del mundo. En al menos 15 de los 27 estados del país hay proyectos para sembrar oleaginosas y construir moliendas y refinerías de aceite vegetal para fabricar biodiesel para el mercado nacional y la exportación. Actualmente Brasil cuenta con 11 plantas de producción y, según consultores del sector, hay otras 95 en diferentes fases de desarrollo, con una inversión de varios centenares de millones de dólares directas e indirectas, [41].

Argentina presenta importantes ventajas para la elaboración de biodiesel, ya que en casi la totalidad de su territorio se presenta algún producto agropecuario para la transformación en aceite: soja, girasol, maní, colza, palma, lino, cártamo, nabo, aceites usados, grasa animales

y otros cultivos no oleaginosos cuya semilla pueda contener aceite (ejemplo: algodón), [42].

#### **5.2.4 Biodiesel en Colombia**

En 2001, se expidió la ley 693, que está articulada a la ley 939 de 2004, con lo que se abrió el camino a la producción de biocombustibles. En la ley 939 de 2004 se estimula la producción y comercialización de biodiesel de origen vegetal o animal en motores diesel, en las calidades que establezcan el Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, [19].

El fruto del trabajo de las especificaciones del biodiesel se ratificó en 2006 en la NTC 5444 Biodiesel para uso en motores diesel. Aquí se cubren las especificaciones para los alquíl esterres de ácidos grasos para uso como combustible o como componente de mezclas con combustibles diesel, cuyas características están definidas en la NTC 1438 Petróleo y sus derivados (Combustibles para motores diesel), [43].

Colombia es el primer productor americano y quinto productor mundial de aceite de palma, por lo cual es el principal cultivo destinado a producción de biocombustibles, [44].

En Colombia en el año 2006 las materias primas vegetales destinadas a la producción de biodiesel fueron 56.000 toneladas y en 2007 fueron 75.000 toneladas, en ambos años no se reportó consumo de una fuente diferente, [45, 46].

En la actualidad Colombia consume más de 89.000 barriles diarios de combustible diesel, [47], y una gran parte de este consumo se puede trasladarse a biodiesel tanto de origen vegetal como animal.

Las importaciones de biodiesel actualmente son de 4.000 barriles diarios y estas son compensadas por las exportaciones de 12.000 barriles diarios de gasolina, [48]. Por lo tanto el biodiesel puede representar un factor económico de importancia para el país, ya que

actualmente se presenta como un combustible sustituto de los tradicionales derivados del petróleo sobre todo debido a la tendencia mundial en cuanto al incremento del precio del petróleo y su incidencia sobre los combustibles derivados, [45].

### **5.2.5 Materia Prima para la producción de biodiesel**

Se han empleado diversas materias primas para realizar esta conversión, para esta categoría se encuentran las siguientes materias grasas:

- Aceites de semillas oleaginosas: girasol, colza, soja y coco. La fuente de aceite vegetal suele ser aceite de colza, ya que es una especie con alto contenido de aceite, que se adapta bien a los climas fríos.
- Aceites de frutos oleaginosos: palma.
- Aceites de semillas oleaginosas alternativas: Brassica carinata, Camelina sativa, Pogianus.
- Aceites de semillas oleaginosas modificadas genéticamente: Aceite de girasol de alto oleico.
- Aceites vegetales de final de campaña: aceite de oliva de alta acidez.
- Aceites de fritura usados.
- Grasas animales (Sebo de distintas calidades), [3].

Con respecto a las grasas animales, se denomina sebo a las grasas procedentes del tejido adiposo de ganado bovino (vaca-buey), ovino y caprino. Se extraen por fusión de estas mediante el aporte de calor en seco o en presencia de agua, que ayuda a la transferencia de calor, a facilitar la extracción y a limitar la temperatura. También existen procesos de extracción con disolventes, ya que las grasas se disuelven bien en disolventes no polares, tales como el éter sulfúrico, sulfuro de carbono, benceno, cloroformo y en los derivados líquidos del petróleo, [49, 50].

La composición de ácidos grasos en el sebo bovino se muestra en la tabla 1:

**Tabla 1. Proporción (%) ácidos en sebo bovino, [50].**

Ácido	Mirístico C14:0	Palmítico C16:0	Esteárico C18:0	Oleico C18:1	Linoleico C18:2
%	2	25	20	45	2

Los aceites y grasas pueden ser caracterizados según sus propiedades físicas (densidad, viscosidad, punto de fusión, índice de refracción) o químicas (índice de acidez, índice de yodo, índice de peróxido, índice de saponificación, índice de éster), [22].

### 5.2.6 Obtención del biodiesel

La obtención del biodiesel consiste en una reacción de transesterificación, este tipo de reacción es el proceso de intercambiar el grupo alcoxi (grupo alquilo unido a un átomo de oxígeno, es decir, RO) de un éster por otro alcohol, son frecuentemente catalizadas mediante la adición de un ácido o una base.

Cuando el glicerol se sustituye por el alcohol obtenemos tres moléculas de metiléster (biodiesel) y una molécula de glicerina, [19]. En la figura 1 se presenta la obtención general del biodiesel:

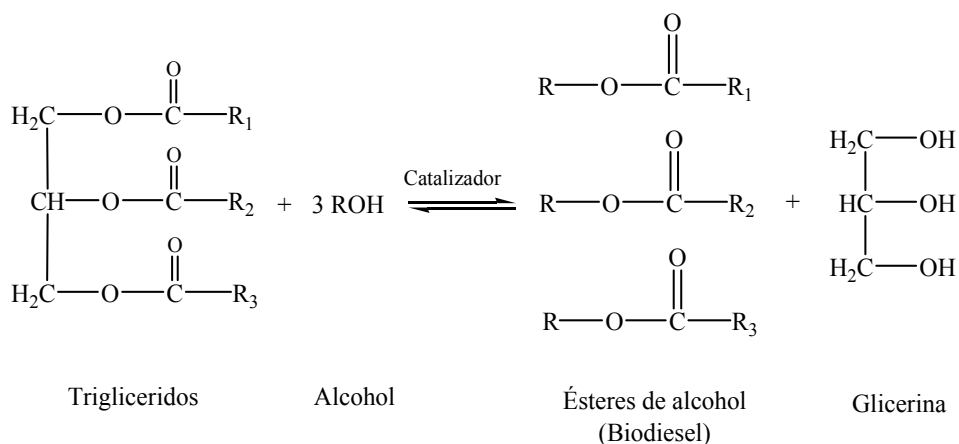


Figura 1. Reacción general de transesterificación, [35].

Donde R es una cadena de alcohol ligero, en el cual ROH es habitualmente metanol cuando se usa para la elaboración con aceites vegetales reciclados. Cuando se utilizan aceites nuevos, es posible la mezcla con etanol.  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  son cadenas generalmente largas de ácidos grasos, [51].

La transesterificación es una reacción reversible, por lo cual es importante adicionar un exceso de alcohol para favorecer la producción de biodiesel, la relación molar estequiométrica aceite-alcohol es de 1:3, pero la relación comprobada experimentalmente para sebo vacuno debe ser de 1:6, ya que en esta relación se encontró un valor aceptable para la viscosidad, [35].

En la reacción de transesterificación se utiliza un catalizador para mejorar la velocidad de reacción y el rendimiento final, sin este no sería posible esta reacción. Los catalizadores pueden ser ácidos homogéneos ( $H_2SO_4$ , HCl,  $H_3PO_4$ ), ácidos heterogéneos (Zeolitas, Resinas Sulfónicas,  $SO_4/ZrO_2$ ), básicos heterogéneos (MgO, CaO, Na/NaOH/ $Al_2O_3$ ), básicos homogéneos (KOH, NaOH) o enzimáticos (Lipasas: Candida, Penicillium, Pseudomonas); de todos ellos, los catalizadores que se suelen utilizar a escala comercial son los catalizadores homogéneos básicos, ya que actúan mucho más rápido y además permiten operar en condiciones moderadas. En el caso de la reacción de transesterificación, cuando se utiliza un catalizador ácido se requieren condiciones de temperaturas elevadas y tiempos de reacción largos, por ello es frecuente la utilización de derivados de ácidos más activos.

La ventaja del KOH es que la glicerina que queda del proceso es mucho menos tóxica que cuando se utiliza NaOH. En este caso, es posible procesar la glicerina para producir un fertilizante artificial. El KOH tiene también la ventaja de que se disuelve mucho mejor en metanol, [12, 35].

El rendimiento de la reacción se calcula con respecto al contenido total de glicerol o glicerina que debe tener el producto final (según la norma ASTM D6584 debe ser máximo



0.24%). La glicerina total es la glicerina libre más la glicerina ligada que se encuentra en forma de monoglicéridos y diglicéridos que son los productos parciales de la reacción de conversión de los triglicéridos a metilesteres. El contenido de glicerina en la trioleína es de 10.24% y en el producto final el máximo permitido es 0.24%, lo que significa que la conversión de triglicéridos en biodiesel debe ser mínimo 97%, [52].

Los esteres grasos producidos pueden mezclarse o no con diesel petrolífero. Al porcentaje de biodiesel puro que se encuentra en el combustible, se le denomina porcentaje de biomasicidad o, simplemente, bioesteraje. Así, el Biodiesel B30 tiene un 30% de bioesteraje, es decir, un 30% de ésteres grasos y un 70% de diesel petrolífero, [53].

### **5.2.7 Reacciones secundarias**

Debido a la utilización de álcalis, que es la opción más utilizada a escala industrial, implica que los glicéridos y el alcohol deben ser anhidros ( $<0,06\%$  v/v) para evitar que se produzca la saponificación. Además, los triglicéridos deben tener una baja proporción de ácidos grasos libres para evitar que se neutralicen con el catalizador y se formen también jabones.

Por lo tanto, la reacción de obtención de biodiesel debe ser muy controlada ya que la presencia de agua puede causar la saponificación de los ésteres y consumir el catalizador, reduciendo su eficiencia.

De esta manera las reacciones secundarias que se pueden dar son las siguientes:

- Reacción de saponificación
- Reacción de neutralización de ácidos grasos libres, [54].

La saponificación es la reacción inversa de la esterificación. Es una reacción de hidrólisis en medio alcalino que consiste en la descomposición de un éster en el alcohol y la sal alcalina del ácido carboxílico correspondientes, [55], es decir, el triglicérido reacciona con

el catalizador básico, consumiendo éste, en presencia de agua dando lugar a la formación de jabones.

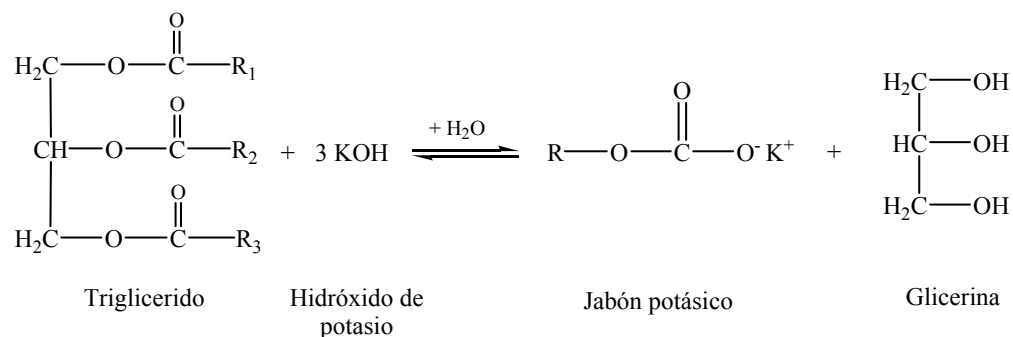


Figura 2. Reacción de saponificación, [55].

La saponificación está favorecida cuando se utiliza el hidróxido como catalizador, ya que sus moléculas contienen los grupos  $\text{OH}^-$  responsables de esta reacción. Así, cuando se utilizan estos catalizadores, se debe tener especial precaución con las condiciones de reacción, especialmente la temperatura y la cantidad de catalizador básico, para reducir al máximo la saponificación. Sin embargo, los metóxidos sólo contienen el grupo  $\text{OH}^-$  como impureza, por lo que su utilización no produce prácticamente jabones por saponificación.

En cualquier caso, se deben utilizar aceites y alcoholes esencialmente anhidros, ya que el agua favorece la formación de jabones por saponificación. Por este motivo, se debe eliminar el agua, mediante evaporación, en los aceites con altos contenidos en humedad antes de llevar a cabo la transesterificación, [54].

Por otra parte, hay dos maneras de eliminar los ácidos grasos libres presentes en el aceite. Así, se puede proceder a su neutralización, ya que los ácidos grasos presentes en el aceite vegetal pueden reaccionar con el catalizador básico (fundamentalmente  $\text{NaOH}$ ) en presencia de agua, ocurriendo asimismo una reacción indeseable, produciendo como en el caso anterior jabón.

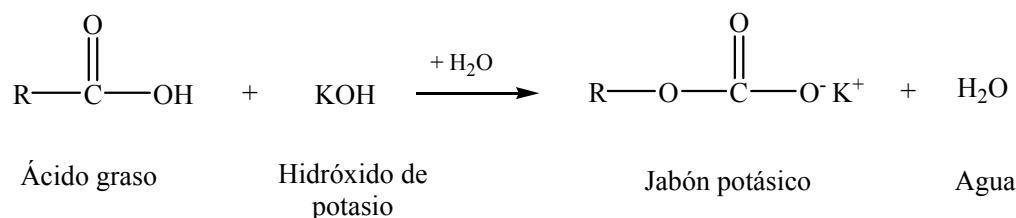


Figura 3. Reacción de neutralización de ácidos grasos libres, [54].

Otra manera de eliminar los ácidos grasos libres es mediante una reacción de esterificación con un catalizador ácido con lo que se formaría el éster metílico, [35].

### 5.2.8 Desempeño mecánico del biodiesel

Los motores diesel transforman la energía química contenida en el combustible en energía mecánica. El combustible es inyectado a una presión superior a la existente en el interior de los cilindros mezclándose con el aire comprimido y realizándose el proceso de combustión [56]. La evaluación de biodiesel consiste en analizar el desempeño del motor en cuanto potencia y torque, debido que son dos indicadores del funcionamiento del motor. El torque es la fuerza que producen los cuerpos en rotación (el motor produce fuerza en un eje que se encuentra girando), la potencia indica la rapidez con que puede trabajar el motor [57].

Otro factor que evalúa el desempeño mecánico de un combustible es el consumo específico. Este corresponde a la cantidad de combustible que necesita un motor para suministrar una determinada unidad de potencia por unidad de tiempo. Es una forma de expresar el rendimiento del motor, en el sentido que relaciona consumo con prestaciones. Cuanto menor sea el consumo específico de un motor, mejor es su rendimiento, [58].

Una manera de apreciar el desempeño ambiental de un combustible es mediante el concepto de opacidad. La opacidad es la capacidad que tienen las emisiones de gases de oponerse al paso de un haz de luz a una frecuencia determinada. Se mide en porcentaje y corresponde al nivel de obscuridad de las emisiones de un vehículo diesel, [59].

De acuerdo a los principales fabricantes de automóviles europeos y de EEUU para utilizar el biodiesel, prácticamente no es necesario efectuar modificaciones en los motores diesel estándar. En EEUU, el biodiesel es el único combustible alternativo que responde a las severas exigencias del EPA (Environmental Protection Agency), [60].

Si se utiliza biodiesel puro, o en mezclas mayores al 20%, se debe comprobar que los materiales de todas las mangueras y empaquetaduras del sistema de combustible son compatibles con este biocombustible. Muchas marcas de vehículos ya vienen de fábrica con mangueras resistentes al biodiesel, pero no todas, ya que estos materiales son ligeramente más caros.

Para que el biocombustible sea aceptable se deben evaluar una clase de características para que sea favorable el desempeño del motor, el cual se evalúa de acuerdo a las siguientes características: facilidad de arranque, desarrollo de potencia, nivel de ruido, economía de combustible, desgaste (lubricidad), operabilidad a baja temperatura, duración del filtro, emisiones de escape, [61].

El contenido energético del biodiesel es ligeramente menor que el del diesel (12% en peso y 8% en volumen), y por lo tanto su uso implicará un consumo ligeramente mayor, así como ciertas pérdidas en potencia y torque, [22].

### **5.2.9 Calidad del biodiesel**

Las propiedades del biodiesel dependen tanto del proceso de fabricación como de la calidad de los reactivos empleados y de la naturaleza de los lípidos a partir de los cuales se ha producido, [35]. Por lo tanto, la calidad del biodiesel es generalmente controlada en base a ciertos parámetros físicos y químicos establecidos por normas técnicas aprobadas en cada país.

La reglamentación del Gobierno Nacional Colombiano estableció que a partir del 1 de enero de 2008 se debió empezar a comercializar el biodiesel en la mayoría del territorio colombiano, [61]. Por lo anterior, ha sido necesario crear una reglamentación que establezca los niveles y especificaciones de calidad, tanto para las materias primas como para la mezcla final. Así que el Gobierno Nacional creó en 2003 la "Mesa Nacional de Bicocombustibles", en la cual se delegó a ICONTEC la función de desarrollar las Normas Técnicas Colombianas concernientes a los biocombustibles, [43].

Entre las normas que exigen la calidad del biodiesel las más completas son las ASTM D6531 y las normas europeas EN 14214, las cuales especifican los rangos que deben cumplir algunos parámetros y los procedimientos de determinación de los mismos. En la tabla 2 se hace un resumen de las principales:

**Tabla 2. Normas para biodiesel como combustible, [62].**

<b>Propiedad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Requisito</b>	<b>Método de Ensayo</b>
Densidad a 15°C	Kg/m <sup>3</sup>	860 - 900	ASTM D4052 - ISO 3675
Viscosidad cinemática (40°C)	mm <sup>2</sup> /s	1,9 – 6,0	ASTM D613 - ISO 5165
Contenido de agua	mg/kg	500 máximo	ASTM E203 - ISO 12937
Punto de inflamación	°C	120 mínimo	ASTM D93 - ISO 2719
Contenido de metanol o etanol	% en masa	0,2 máximo	ISO 14110
Corrosión en lámina de cobre	Unidad	Clase 1	ASTM D130 - ISO 2160
Índice de yodo	g yodo/100 g	120 máximo	EN 14111
Cenizas sulfatadas	% en masa	0,02 máximo	ASTM D874 - ISO 3987
Contenido de éster	% en masa	96,5 mínimo	EN 14103
Glicerina total	% en masa	0,25 máximo	ASTM D6584 - ISO 14105
NOTA: El poder calorífico inferior de referencia reportado por el método ASTM D240 debe estar alrededor de 39 500 KJ/Kg.			

ASTM: Normas americanas

ISO: Normas internacionales

EN: Normas europeas

## **5.2.10 FUNDAMENTO DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LA GRASA**

Se deben tener en cuenta algunos parámetros para evaluar la calidad de la materia prima a trabajar, y de esta manera analizar el cumplimiento de los requisitos del producto final.

### **5.2.10.1 Humedad**

La humedad se determina por medio de un método gravimétrico, en el cual se considera la diferencia de peso de la muestra de análisis que se encuentra inicialmente húmeda y posteriormente es secada a una temperatura de 105°C por un tiempo de 4 horas de acuerdo a la norma ICONTECN 254, [63, 64].

### **5.2.10.2 Cenizas**

Se realiza por gravimetría. El método consiste en la incineración directa de una masa conocida de la muestra de análisis, la cual se pesa después de ser sometida hasta 600 °C, [63, 64]. El procedimiento se realiza según la norma ICONTEC 3.4 1994-10-19, el resultado se reporta como porcentaje (%) de cenizas, que es semejante al porcentaje de minerales de la muestra, [65].

### **5.2.10.3 Extracto etéreo**

El análisis se hace por el método Soxhlet, el cual es un sistema de extracción cíclico de los componentes solubles en éter que están presentes en la muestra, la prueba concluye con el pesado del extracto obtenido (gravimétrico).

El método Soxhlet brinda una extracción intermitente con un exceso de disolvente recién condensado. La eficiencia de este método depende tanto del pre-tratamiento de la muestra como de la selección del disolvente.

El equipo de extracción consiste en tres partes: el refrigerante, el extractor, que posee un sifón que se acciona automáticamente y el recipiente colector, donde se recibe o deposita la grasa, [64, 66].

El procedimiento se realiza de acuerdo a la norma NTC 668, el resultado de esta prueba se reporta como porcentaje (%) de extracto etéreo que es equivalente al porcentaje de grasa en la muestra, [67].

#### **5.2.10.4 Índice de acidez**

Es la medida del número de miligramos de hidróxido de potasio requerido para neutralizar los ácidos grasos libres en un gramo de aceite o grasa.

Se realiza por métodos volumétricos siguiendo la Norma ICONTEC 218 para grasas y aceites, la acidez se puede reportar como porcentaje (%) de ácido oleico, ácido palmítico o ácido laurico, pero como el ácido graso mayoritario en la grasa vacuna es el ácido oleico, se calcula en base a este tipo de porcentaje, [68].

Los aceites y grasas refinados deben tener un nivel de ácidos grasos libres inferior al 0,2% como ácido oleico para ser aptos para su uso en alimentación. Sin embargo, los aceites crudos y los usados previamente en frituras, comúnmente tienen un contenido de ácidos grasos libres significativamente superior a éste (2% o más).

Este índice es particularmente importante para el proceso de producción de biodiesel (transesterificación), ya que los ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador de la transesterificación (NaOH ó KOH) formando jabones (saponificación), lo cual lleva a un menor rendimiento en la producción de biodiesel. La saponificación no sólo consume el catalizador necesario para la transesterificación, sino que además los jabones producidos promueven la formación de emulsiones que dificultan la purificación de biodiesel.

El valor del índice de acidez permite concluir el método acertado para la reacción para producir el biodiesel, cuando la materia prima tiene valores de acidez mayores de 2%, en una primera etapa se realiza la transesterificación de los ácidos grasos libres en biodiesel utilizando como catalizador ácido sulfúrico y en una segunda etapa la reacción de transesterificación de los aceites o grasas usando como catalizador una base, [22, 69].

#### **5.2.10.5 Índice de saponificación**

El índice de saponificación es una medida aproximada del peso molecular promedio de los ácidos grasos. No es exacto para apreciar dicho peso molecular, ya que se incluyen los ácidos grasos libres junto con los glicéridos, [70].

El procedimiento radica en saponificar completamente una muestra conocida de grasa utilizando un exceso de solución alcohólica de hidróxido de potasio, y finalmente ese exceso de solución alcalina es valorado. La reacción se muestra en la figura 2. El resultado se expresa como miligramos de hidróxido de potasio requeridos para saponificar un gramo de sustancia grasa. Su determinación está descrita en la Norma para grasas y aceites ICONTEC 335, [71].

#### **5.2.10.6 Índice de yodo**

Este parámetro mide la insaturación total existente en una mezcla de materias grasas, sin tener en cuenta los porcentajes relativos entre los compuestos mono y poliinsaturados. El mismo implica una importante restricción en cuanto a las materias primas que pueden ser utilizadas para la producción de biodiesel, [72].

La técnica se basa en un método volumétrico denominado método de Hanus, el cual se fundamenta en tomar una cantidad conocida de grasa que es sometida a la acción del reactivo de Hanus (solución de monobromuro de yodo en ácido acético) y luego de un



tiempo determinado se valora el exceso de yodo que no reaccionó, a continuación se muestran las tres reacciones involucradas:

1.  $\text{IBr} + \text{R}_1 - \text{CH} = \text{CH} - \text{R}_2 \rightarrow \text{R}_1 - \text{CHBr} - \text{CHI} - \text{R}_2$
2.  $\text{KI} + \text{KBr} \rightarrow \text{KBr} + \text{I}_2$
3.  $\text{I}_2 + 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-} \rightarrow 2\text{I}^- + \text{S}_4\text{O}_6^{2-}$ , [73].

El resultado se expresa como gramos de yodo en 100 g de muestra. Esta prueba se realizó de acuerdo a la Norma ICONTEC 283, [73].

Cuanto mayor sea el índice de yodo mayor será el número de dobles enlaces por unidad de grasa, utilizándose por ello para comprobar la pureza y la identidad de las grasas (por ejemplo, el índice de yodo del ácido oleico es 90, del ácido linoleico es 181 y del ácido linolénico 274). A la vez que los dobles enlaces de los ácidos grasos insaturados se determinan también las sustancias acompañantes insaturadas, por ejemplo, los esteroides, [63], además indica la tendencia de oxidación porque da idea del grado de insaturación que poseen sus ácidos grasos.

El grado de insaturación del aceite está relacionado con el punto de fusión del mismo. A mayor cantidad de insaturaciones, el punto de fusión del aceite será menor. Sin embargo, como los aceites naturales están compuestos por diversos ácidos grasos (saturados e insaturados) con distintos puntos de fusión, ellos solidifican en realidad en un rango amplio de temperaturas. Dado que las insaturaciones de los ácidos grasos se mantienen luego de la transesterificación, el punto de fusión del biodiesel está relacionado al del aceite de procedencia, [22].

### 5.2.10.7 Índice de peróxido

El índice de peróxido mide el estado de oxidación primaria que ha sufrido la grasa o aceite, expresa el número de miliequivalentes de oxígeno por kilogramo de grasa, [74]. Se forman en los puntos de insaturación de las cadenas de carbonos de los ácidos grasos.

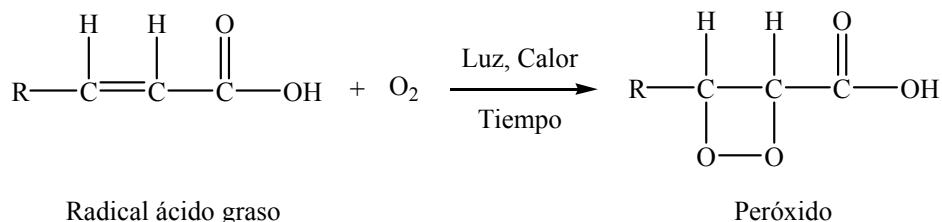


Figura 4. Reacción de oxidación de un ácido graso [3]

La oxidación de las grasas es una de las principales causas de su deterioro, y da lugar a la aparición de olores y sabores desagradables, conocidos como enranciamiento, [22].

Los peróxidos o compuestos de oxidación inicial se originan si el aceite no se protege de la luz y el calor, si es maltratada o no se guarda en envases adecuados, como consecuencia de ello, a mayor índice de peróxido menor será la capacidad antioxidante de un aceite, [75].

Esta prueba se efectúa valorando el yodo liberado con una solución de tiosulfato de una cantidad de muestra conocida. El resultado se expresa como el número de miliequivalentes de oxígeno activo por kilogramo de grasa. La norma con la cual se determina esta prueba es la norma técnica colombiana ICONTEC 236, [74]. Las reacciones implicadas son las siguientes:

1.  $2 \text{I}^- + \text{H}_2\text{O} + \text{ROOH} \rightarrow \text{ROH} + 2\text{OH}^- + \text{I}_2$
2.  $2\text{S}_2\text{O}_3^{2-} + \text{I}_2 \rightarrow \text{S}_4\text{O}_6^{2-} + 2\text{I}^-$ , [74].

#### 5.2.10.8 Humedad

La humedad del sebo bovino se realiza gravimétricamente según la Norma ICONTEC 254, [63] descrita anteriormente.

El contenido de humedad debe ser muy bajo, porque de lo contrario puede obstruir en la reacción de transesterificación, debido a que la presencia de humedad disminuye el rendimiento de la reacción, pues el agua reacciona con los catalizadores alcalinos formando jabones que contaminan el producto final, ya que forman emulsiones muy estables. Por lo cual debe asegurarse la menor cantidad de agua posible durante el proceso, así que si se considera necesario puede realizarse un secado de la materia prima y el uso de alcoholes de más del 98,5% de pureza, [76].

#### 5.2.10.9. Calcio y Magnesio

Estos metales se pueden cuantificar por medio de espectroscopia de absorción atómica. Esta es una de las técnicas analíticas más utilizadas para la determinación de trazas metálicas. Se basa en la medida de la radiación absorbida por un vapor atómico. El vapor atómico se genera mediante una llama en la que se aspira la muestra líquida. La llama se obtiene usando acetileno como combustible y aire como comburente; también es frecuente el uso del óxido nitroso como comburente, obteniéndose, en este caso, temperaturas más altas en la llama, [77].

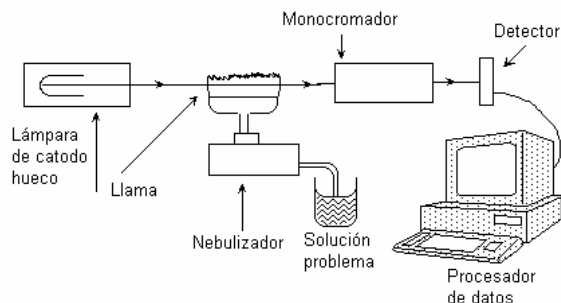


Figura 5. Espectrómetro de absorción atómica, [77].

Los átomos en fase de vapor absorben aquellas radiaciones cuyas energías coinciden exactamente con las de sus transiciones electrónicas. Dado que las líneas de absorción atómica son muy estrechas y que las energías de transición son características de cada elemento, estos métodos son muy específicos.

Como fuente de radiación se emplea una lámpara de cátodo hueco, que emite a la misma longitud de onda que la usada para el análisis de absorción por parte del vapor atómico, este hecho es el responsable de la elevada selectividad que puede conseguirse en las determinaciones realizadas con esta técnica, [77].

En la norma ASTM D5863 se describe el procedimiento de espectroscopia de absorción atómica, el valor obtenido se reporta en miligramos de calcio o magnesio por kilogramo de grasa, [78].

#### **5.2.10.10 Fósforo**

La determinación cuantitativa de fósforo se realiza por métodos espectrofotométricos a 660 nm. El método se basa en medir la intensidad de un espectro determinado en comparación con la intensidad de luz procedente de una fuente patrón. Esta comparación permite determinar la concentración de la sustancia que ha producido ese espectro, [79].

La prueba está descrita en la norma ASTM D4951, el reporte se expresa en miligramos de fósforo por kilogramo de grasa, [80].

#### **5.2.10.11 Cloruros**

El análisis de cloruros se realiza por medio del método de Morh, esta es una determinación directa y cuantitativa que consiste en una titulación de precipitación, [63]. Es decir, la prueba consiste en reaccionar el titulante, en este caso nitrato de plata, con el analito para

formar un precipitado y por medio del volumen utilizado calcular la cantidad de cloruros en la muestra, [71].

Su determinación se describe en la norma ICONTEC 1623, expresándose el resultado en miligramos de cloruros por kilogramo de grasa, [64].

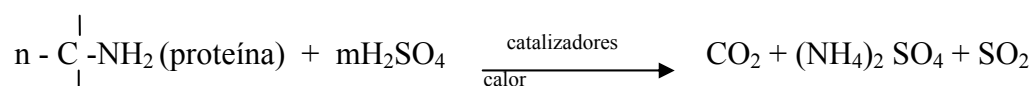
#### 5.2.10.12 Sulfuros

El análisis de sulfuros se realiza por medio de la técnica del azul de metileno (norma ICONTEC 4567, [82]). Este procedimiento se basa en la reacción del anión sulfuro ( $S^{2-}$ ) con cloruro férrico y dimetil p-fenilendiamina para producir azul de metileno. Una vez desarrollado el color se añade al medio de reacción fosfato amónico para eliminar la interferencia de color debida al cloruro férrico. El equipo de medición es un espectrofotómetro. Este método sirve para determinar concentraciones de hasta 20 mg/L de  $S^{2-}$ . El resultado se reporta en miligramos de sulfuro por kilogramo de grasa, [83].

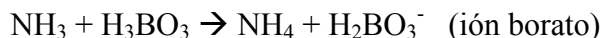
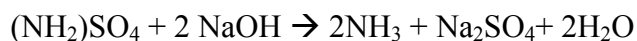
#### 5.2.10.13 Proteínas

El análisis de proteínas se procede por el método Kjeldahl. Este método se basa en la transformación del nitrógeno contenido en la muestra en sulfato de amonio mediante la digestión con ácido sulfúrico en presencia de un catalizador. El ión amonio obtenido se transforma en medio básico en amoníaco que se destila y valora con una solución de ácido patrón, de esta manera se encuentra el porcentaje de nitrógeno y posteriormente por medio de un factor de conversión la cantidad de proteínas, [63, 64]. Las reacciones llevadas a cabo en el método Kjendahl son las siguientes:

Digestión:



Neutralización y destilación:



Titulación:



La norma colombiana de proteínas en alimentos se encuentra en la norma ICONTEC 4657 de 1999, [83], el resultado se expresa en porcentaje (%) de proteínas.

## **5.2.11 FUNDAMENTO DE LOS ANALISIS FISICO-QUÍMICOS DEL BIODIESEL BOVINO**

### **5.2.11.1 Densidad**

La densidad del biodiesel se determina con la ayuda del picnómetro, [84]. El procedimiento está descrito en la norma ASTM D4052, expresándose los resultados gramos por centímetro cubico. Esta norma establece como rango de densidad 0,860 – 0,900 g/cm<sup>3</sup> a 15 °C, [85].

La densidad da idea del contenido en energía del combustible. Mayores densidades indican mayor energía térmica y una economía de combustible mejor, pero de igual manera la mayor densidad del biodiesel puede causar problemas en los actuales sistemas de inyección de los motores y, a bajas temperaturas, plantea problemas de solidificación y congelación, [22].

### **5.2.11.2 Índice de refracción**

El índice de refracción de una sustancia o un medio transparente, es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en la sustancia o el medio transparente. Es una constante característica de cada medio. Como el índice de refracción es sensible a los cambios de temperatura y varía con la longitud de onda de la luz, deben especificarse ambas variables al expresar el índice de refracción de una sustancia, [86]. El equipo que se utiliza para este análisis es el refractómetro, [64].

Esta prueba se desarrolla según la Norma ICONTEC 268, dado el caso debe realizarse una corrección en la temperatura, [87].

### **5.2.11.3 Viscosidad cinemática**

La viscosidad es la medida de la fricción interna entre moléculas, o de la resistencia a fluir de los líquidos, [22].

El método que se emplea para determinar este parámetro es por medio del uso del viscosímetro de Ostwald. Este tipo de viscosímetros son generalmente contruidos de vidrio y hallan la viscosidad de un líquido midiendo el tiempo de flujo de un volumen dado del líquido en un tubo capilar bajo la influencia de la gravedad. Este tipo de viscosímetro viene calibrado y las constantes de fábrica dependen del recorrido que realice el fluido por los bulbos o ampollas. Está formado por un capilar unido por su parte inferior a una serie de ampollas, por donde se hace fluir el líquido, [88].

Esta prueba sigue los requisitos de la norma ASTM D445 especificada para diesel, el resultado se expresa en unidades de milímetros cuadrados por segundo. La norma establece como rango viscosidades entre 1,9 – 6.0 mm<sup>2</sup>/s, [89].

En el biodiesel se obtienen valores más altos si se los compara con diesel mineral. La viscosidad disminuye con presencia de compuestos instaurados pero aumenta marcadamente con la presencia de compuestos mono, di o triglicéridos, [90].

Por lo tanto esta propiedad es mayor en el caso del biodiesel que en diesel convencional, y en algunos casos a bajas temperaturas el biodiesel se puede convertir en un producto demasiado viscoso e incluso solidificar, [91].

El biodiesel presenta una viscosidad mucho menor que la de su correspondiente material graso por lo que es más apto para su uso como combustible, [33].

Se considera que el biodiesel debe poseer una viscosidad mínima para evitar pérdidas de potencia debidas a las fugas en la bomba de inyección y en el inyector. Además, le da características de lubricidad al sistema de combustible. Por otra parte también se limita la viscosidad máxima por consideraciones de diseño y tamaño de los motores, y en las características del sistema de inyección, [3].

#### **5.2.11.4 Punto de inflamación**

El punto de inflamación o de ignición de un combustible es la temperatura mínima a la cual los vapores del combustible se hacen inflamables. Este parámetro generalmente se determina para satisfacer temas legales de seguridad. También es útil para conocer si existe una cantidad excesiva de alcohol no reaccionado en el proceso de obtención en el caso del biodiesel, [35].

Esta propiedad es llevada a cabo por el método del vaso abierto Cleveland. Este instrumento generalmente consiste en un recipiente de bronce tipo copa, tarado a medida normalizada, una fuente de calor que puede ser eléctrica (con regulador) o a gas, termómetros, soportes y un aplicador de llama que produce la inflamación, [92].



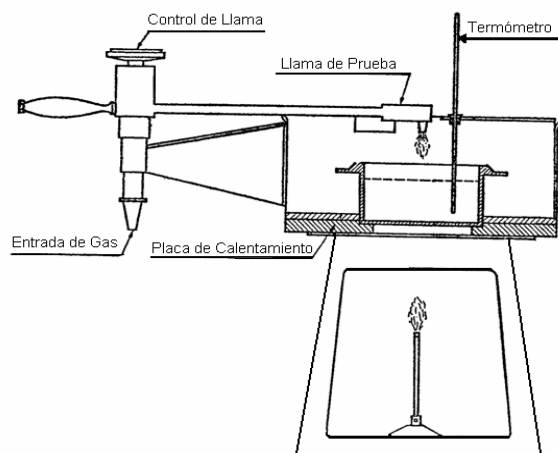


Figura 6. Vaso abierto Cleveland, [92].

Esta temperatura es hallada en °C según la normatividad ASTM D92. En esta norma el valor mínimo permitido es 120 °C, [93].

#### 5.2.11.5 Poder calorífico

El poder calorífico es la cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación. El poder calorífico expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente y es igual a la energía que mantenía unidos los átomos en las moléculas de combustible, menos la energía utilizada en la formación de nuevas moléculas en las materias (generalmente gases) formadas en la combustión, [94].

La prueba se realiza con la ayuda de la bomba calorimétrica, [95]. Este equipo se usa para determinar el poder calorífico de un combustible cuando se quema a volumen constante. El combustible cuyo poder calorífico se desea determinar se coloca en un crisol para combustible dentro de la bomba calorimétrica. Se agrega el oxígeno necesario para la combustión. La bomba calorimétrica se rodea de una camisa de agua que absorbe el calor liberado por el combustible. Todo esto se realiza dentro de una camisa adiabática para evitar fuga de calor que afecte el proceso. Sin embargo, el calor que absorbe el agua no es

el poder calorífico del combustible, debido a diversos factores, entre los cuales pueden nombrarse: absorción de calor por la propia bomba, liberación de calor del alambre que provoca el encendido del combustible, liberación de calor por la formación de ácido nítrico y sulfúrico, entre otros, [89].

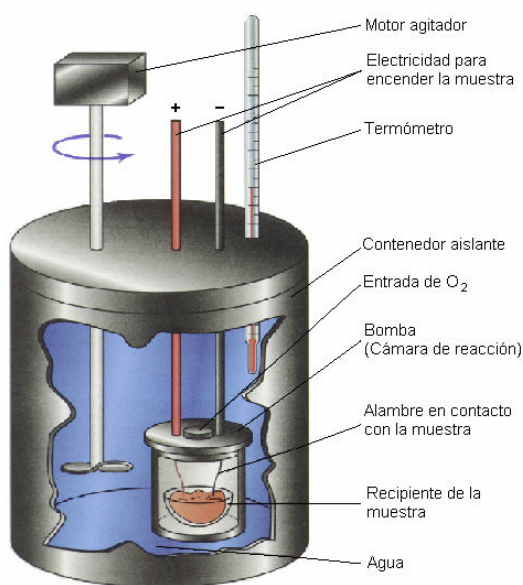


Figura 7. Bomba Calorimétrica, [97].

Esta prueba es efectuada por el método de la norma ASTM D240, el resultado se determina en KJ/Kg. Esta norma establece como requisito que el poder calorífico se encuentre alrededor de 39500 KJ/Kg, [97].

#### 5.2.11.6 Color y apariencia

Es importante evaluar la apariencia de un combustible y su intensidad de color, ya que al apreciar la apariencia se visualiza el agua dispersa en el biodiesel, esta se encuentra en cantidades ínfimas, y es la responsable de que el biodiesel no sea transparente a pesar de estar en un frasco de vidrio transparente, por lo cual aparece turbio y de color naranja, [98].

El análisis se trata de una prueba cualitativa, ya que se realiza por medio de observación visual de la muestra. La apariencia consiste en chequear visualmente la evidencia de agua o contaminación de partículas, esto según el procedimiento 1 de la norma ASTM D4176, [99].

La determinación del color incluye la comparación de la muestra de combustible con una guía de referencia de colores. La prueba de color se procede de acuerdo a la norma americana ASTM D1500, el resultado es según el grado de color más semejante a la escala de colores según la norma, [100].

#### **5.2.11.7 Índice de yodo**

Este análisis es desarrollado con el mismo procedimiento del análisis de grasas señalado anteriormente, es decir, con la norma colombiana ICONTEC 283, los resultados deben ser reportados en gramos de yodo por 100 gramos de muestra, [73].

En la norma EN 14111 se establece el límite para el biodiesel con respecto a este parámetro, el cual tiene como valor máximo 120 g I<sub>2</sub>/100 g, [78].

A mayor grado de insaturación (mayor índice de yodo) se obtendrá un biodiesel con menor índice de cetano, propiedad importante para la calidad de la combustión en el motor. Valores altos de índice de yodo favorecen los procesos de polimerización de hidrólisis, [101].

#### **5.2.11.8 Humedad**

La humedad del biodiesel es realizado de manera semejante al análisis de la grasa, esto es, gravimétricamente según la norma ICONTEC 254, [64].

La norma ISO 12937 presenta como requisito que la humedad sea como máximo 0,05 %, [78].

#### 5.2.11.9 Corrosión de la lámina de cobre

Se define como la probabilidad de causar corrosión en las partes de motor construidas en cobre, bronce o zinc, [22].

Esta prueba realiza según el procedimiento enmarcado dentro de la norma ASTM D130. Este consta en sumergir una lámina pulida de cobre en la muestra a ensayar durante tres horas a 100 °C. La lámina luego se extrae y se compara en forma visual contra una serie de láminas patrones (ver figura 9) y de esta manera se clasifican con los números 1, 2, 3 y 4 más las letras a, b, c, d, e. El nivel máximo permitido es hasta el número 3, [102].

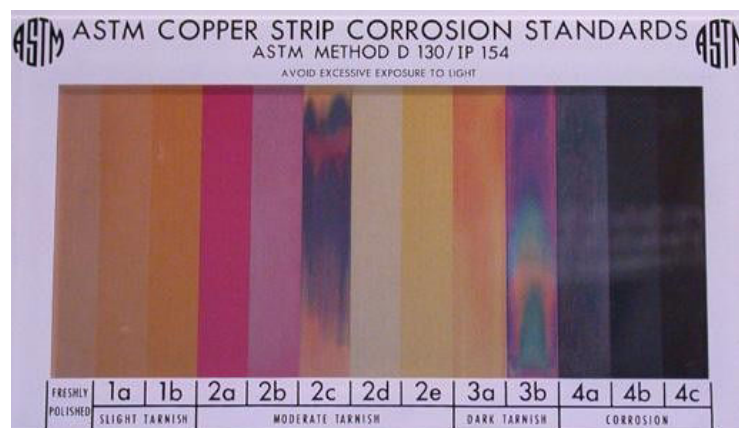


Figura 8. Láminas patrón para la norma ASTM D130, [103].

### 5.2.12 MÉTODOS INSTRUMENTALES PARA ANÁLISIS CUANTITATIVO

#### 5.2.12.1 Cromatografía de gases/ Espectrometría de masas (GC/MS)

La utilización de la cromatografía de gases acoplada a un espectrómetro de masas requiere sistemas especiales de conexión. En principio, se trata de dos técnicas que trabajan en fase

gaseosa y necesitan una muy pequeña cantidad de muestra para su análisis, por lo que son muy compatibles.

El método consiste en la inyección de una mezcla de compuestos en el cromatógrafo de gases, la cual es separada en la columna cromatográfica, obteniendo la elución sucesiva de los componentes individuales aislados que pasan inmediatamente al espectrómetro de masas. Cada uno de estos componentes se registra en forma de pico cromatográfico y se identifica mediante su respectivo espectro de masas.

En este proceso, el espectrómetro de masas, además de proporcionar los espectros, actúa como detector cromatográfico al registrar la corriente iónica total generada en la fuente iónica, cuya representación gráfica constituye el cromatograma o “TIC” (total ion current). En efecto, la corriente iónica generada por todos los iones da lugar a un pico gaussiano de área proporcional a la concentración del compuesto detectado, [104].

### **5.2.13 PRUEBAS MECÁNICAS DEL BIODIESEL EN MOTOR DIESEL**

Las pruebas en el motor diesel permiten evaluar el comportamiento del combustible en cuanto desempeño mecánico y ambiental. Durante las pruebas las variables manipuladas son: la apertura de la válvula solenoide, las posiciones del acelerador y los tipos de combustibles. Las variables medidas son: el torque, las revoluciones por minuto, el consumo de combustible y la opacidad. Posteriormente es calculada la potencia y el consumo específico de combustible. Las expresiones de los cálculos se encuentran en el anexo C. El procedimiento realizado se resume en los pasos expresados en el anexo D.

Estas pruebas mecánicas se realizan de acuerdo a las normas técnicas vigentes: ICONTEC 1930 de 1996 y la norma ICONTEC 2016 de 1985. Estas normas ayudan a determinar qué parámetros en el experimento pueden ser considerados durante la ejecución, teniendo en cuenta las limitaciones que se presenten en el laboratorio disponible, [105].

#### **5.2.14 ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Los análisis se realizan por triplicado y los resultados se reportan siempre respecto a los niveles mínimos de detección y cuantificación de los métodos utilizados.

Se aplicaron pruebas de rechazo para datos discordantes y se expresaron los resultados a un límite de confianza de  $P 0.05$ , [86].

Las dos medidas de precisión más comunes son repetibilidad y reproducibilidad (grado de acuerdo entre resultados mutuamente independientes de un ensayo), que representan los dos extremos de la precisión que se pueden obtener, [106].

##### **5.2.14.1 Promedio**

El promedio consiste en la suma de todas las medidas, dividida por el número de medidas. El promedio es una medida de la tendencia central, es decir, la suma de sus desviaciones es cero, y dado que comprende a un número diferente de observaciones no puede ser un valor absoluto, [107].

##### **5.2.14.2 Desviación estándar**

La desviación estándar sirve para dar una interpretación precisa de las observaciones dentro de la distribución, ya que su magnitud esta expresada en términos de distancia, la cual representa la dispersión de cada valor de la variable respecto a un valor central. Este valor consiste en la raíz cuadrada positiva de la media de los cuadrados de las desviaciones de las observaciones con respecto a la media, [108].

### 5.2.14.3 Coeficiente de variación

Se utiliza el coeficiente de variación ya que permite estimar con claridad la tendencia al equilibrio o desequilibrio que presenta una medición individual o un conjunto de mediciones. Este valor se obtiene relacionando la desviación estándar con el promedio  $((\text{Desviación estándar}) \cdot 100 / (\text{promedio}))$ . Cuanto mayor es la cifra de la variación más desequilibrio expresa. El coeficiente de variación es típicamente menor que uno pero para su mejor interpretación se lo expresa como porcentaje. A menor coeficiente de variación se considera que la distribución de la variable medida es más homogénea. Se puede interpretar de la siguiente manera, [108]:

**Tabla 3. Interpretación del coeficiente de variación, [108]**

<b>Coeficiente Variación (%)</b>	<b>Interpretación</b>
5<	Muy bueno
5-10	Bueno
10-15	Aceptable
15-25	Malo (utilizar con precaución)
>25	Malo – A desechar

## **6. METODOLOGÍA**

### **6.1 Muestra de análisis:**

#### **6.1.1 Procedencia**

La grasa bovina con la cual se trabajó se obtuvo de residuos de carnicería de la ciudad de Pereira. Inicialmente fue recolectada por un integrante de la empresa INPRA Ltda. y posteriormente se consiguió en la carnicería “Los Reyes” del centro de la ciudad.

#### **6.1.2 Selección**

Se procuró que la materia prima a trabajar estuviera exenta de materia diferente a sustancia grasa (como vísceras), para de esta manera lograr un mejor rendimiento de extracción.

En el mismo instante de la obtención de la materia prima se procedió a un proceso de molienda para facilitar su manejo y aumentar el contacto en el proceso de extracción.

#### **6.1.3 Almacenamiento**

Para beneficio de conservación, ya que se trata de una materia prima de origen animal, esta guardó en recipientes cerrados y bajo refrigeración.

### **6.2 Análisis de materia prima:**

Esta caracterización se basó en la realización de pruebas para los residuos grasos de carnicería con respecto a los siguientes parámetros:



### **6.2.1 Humedad**

Se realizó por triplicado empleando la norma ICONTEC 254, [63, 64].

### **6.2.2 Cenizas**

Se trabajó por triplicado según la norma ICONTEC 3.4 1994-10-19, [65].

### **6.2.3 Extracto etéreo**

De acuerdo a la norma ICONTEC 668 esta prueba se realizó por triplicado, [67].

## **6.3 Extracción de la grasa**

La extracción de la grasa bovina se realizó por dos métodos:

- El método soxhlet (norma ICONTEC 668), [67] empleando como solvente n-hexano en una relación masa volumen 1:5 por un tiempo de 3 horas.
- El método de fusión húmeda trabajada con agua directa, empleando como equipo una olla a presión doméstica de capacidad de 6 litros. Se manejó una relación de masa volumen de 1:5 por un tiempo de 2 horas.

## **6.4 Análisis químico de la grasa extraída**

### **6.4.1 Índice de acidez**

El análisis se desarrolló por triplicado según la norma ICONTEC 218 para grasas y aceites, [68].

#### **6.4.2 Índice de saponificación**

El procedimiento se realizó por triplicado siguiendo la norma ICONTEC 335 para grasas y aceites, [69].

#### **6.4.3 Índice de yodo**

Esta prueba se realizó por triplicado por medio de la norma ICONTEC 283, [73].

#### **6.4.4 Índice de peróxido**

El análisis se realizó por triplicado según la norma ICONTEC 236, [74].

#### **6.4.5 Humedad**

El procedimiento se efectuó por triplicado según norma ICONTEC 254, [64].

#### **6.4.6 Calcio y Magnesio**

En la norma ASTM D5863 se describe el procedimiento que se desarrolló por triplicado, [78].

#### **6.4.7 Fósforo**

Este análisis se realizó por triplicado según la norma ASTM D4951, [80].

#### **6.4.8 Cloruros**

Esta prueba se ejecutó por triplicado con base a la norma ICONTEC 1623, [64].

#### **6.4.9 Sulfuros**

Este análisis se desarrolló por triplicado con la norma ICONTEC 4567, [82].

#### **6.4.10 Proteínas**

El método trabajado se realizó por triplicado según norma ICONTEC 4657 de 1999, [84].

### **6.5 Obtención de Biodiesel**

Posterior al análisis de acidez, donde se verificó un valor  $<2\%$ , se procedió a realizar la transesterificación de la grasa obtenida, implementando el siguiente sistema:

Se empleó un balón de fondo plano de 1 L acoplado a un condensador de espiral usando agua como refrigerante, al balón se le adicionó la materia grasa pesada y luego el metóxido preparado previamente (concentración catalizador (KOH):  $0,5\%$  (p/v); relación molar metanol – grasa: 6:1).

La reacción se llevó a cabo a una temperatura entre  $65 - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  con agitación magnética por 1 hora al baño maría, [35, 69]. Terminada la reacción, se separaron los metilesteres obtenidos por decantación para su posterior limpieza y purificación.

El lavado se realizó en un embudo de separación de 500 mL con agua destilada empleando una relación biodiesel:solvente 1:1, realizada por triplicado. En cada separación se dejó reposar 2 horas.

La purificación del biodiesel se realizó por medio de un adsorbente de bentonita de calcio (Biosil G, Süd-Chemie de México S.A. de C.V), empleando por cada mililitro de biodiesel 0,370 g de adsorbente, [109].

La purificación se realizó en un beaker de 1 L con agitación por ultrasonido (en un equipo ULTRASONIC 19H) a temperatura ambiente por 15 minutos. Posteriormente se dejó reposar por 24 horas y se filtró al vacío para la separación y secado del biodiesel.

El biosil G recuperado se limpió con éter de petróleo y etanol a 110°C en estufa para su reutilización. El secado se realizó en estufa a una temperatura mayor a 90 °C por un tiempo de 4 horas, [69].

## **6.6 Análisis de los metilesteres obtenidos**

Todos los análisis físicos y químicos se evaluaron por triplicado y a las mismas condiciones:

### **6.6.1 Métodos físicos**

#### **6.6.1.1 Densidad**

Esta prueba se realizó por triplicado según la norma ASTM D4052, [85].

#### **6.6.1.2 Índice de refracción**

Prueba que se ejecutó por triplicado según la Norma ICONTEC N 268, [87].

#### **6.6.1.3 Viscosidad cinemática**

Se trabajó por triplicado con los requisitos de la norma ASTM D445, [89].

#### **6.6.1.4 Punto de inflamación**

Este procedimiento se llevó a cabo por triplicado con la norma ASTM D93, [93].

#### **6.6.1.5 Poder calorífico**

Este análisis se realizó por triplicado adaptando la norma ASTM D240, [97].

#### **6.6.1.6 Apariencia**

Esta prueba se realizó según la norma ASTM D4176, [99].

#### **6.6.1.7 Color**

El color se determinó por triplicado según la norma ASTM D1500, [100].

### **6.6.2 Métodos químicos**

#### **6.6.2.1 Índice de yodo**

Esta prueba se realizó por triplicado de acuerdo a la norma ICONTEC 283, [73].

#### **6.6.2.2 Humedad**

El contenido de agua se analizó por triplicado con la norma ICONTEC 254, [64].

#### **6.6.2.3 Corrosión de la lámina de cobre**

Este ensayo se realizó por triplicado según el procedimiento enmarcado dentro de la norma ASTM D130, [102].

## 6.7 Cromatografía de gases para metilesteres

La composición química del biodiesel producido fue analizada empleando un sistema cromatográfico (CG-EM) marca Shimadzu QP-2010, equipado con inyector automático (AOC-20i), automuestreador (AOC-20s), modo de control de flujo: velocidad lineal, velocidad lineal: 40,4 cm/s, total de flujo: 98,4 mL/min, flujo de la columna: 1,20 mL/min, modo de ionización: impacto electrónico (EI), potencial de ionización (PI): 70 ev. Con columna Famewax de 30 m de largo, 0.32 mm DI, 0.25  $\mu$ m de partícula y el gas de arrastre helio. Se empleó un programa de temperatura en el equipo, iniciándose el proceso a 80°C durante 4 minutos, luego se incrementó la temperatura a razón de 3°C/min hasta 240°C y se mantuvo por 2 minutos (ver figura 3). Se empleó el monitoreo de ión selectivo.

Para la identificación de los metilesteres de los ácidos grasos, se empleó un estándar comercial que contiene una mezcla de 28 metil esteres de ácidos grasos marca RESTEK con código 35078. La concentración del estándar fue de 30 mg/mL, [110]. El análisis cromatográfico del estándar, la tabla con el contenido de sus diversos metilesteres y sus picos representativos en espectrometría de masas se encuentran en el anexo A.

En la tabla 4 se muestran las condiciones del método:

**Tabla 4. Condiciones para análisis del biodiesel bovino por CG-EM**

<b>Temperatura del horno</b>	80°C
<b>Temperatura de inyección</b>	225°C
<b>Modo de inyección</b>	Split
<b>Modo de control de flujo</b>	Velocidad lineal
<b>Flujo de la columna</b>	1,20 mL/min.
<b>Velocidad lineal</b>	40,4 cm/s
<b>Modo de ionización</b>	IE
<b>Potencial de ionización</b>	70 ev
<b>Temperatura de la fuente de iones</b>	250°C
<b>Temperatura de la interfase</b>	250°C
<b>Tiempo de inicio</b>	2,5 min
<b>Tiempo de finalización</b>	59 min
<b>Intervalo</b>	0,2 s

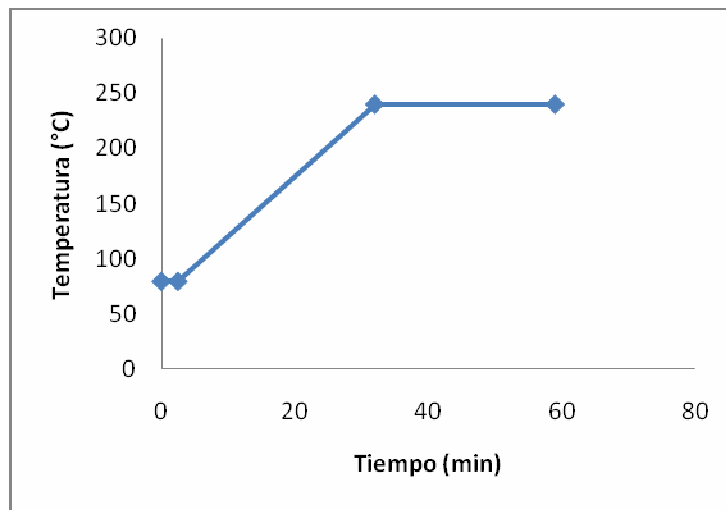


Figura 9. Condiciones de temperatura para análisis del biodiesel bovino por CG-EM

### 6.8 Ensayo del biocombustible en motor diesel

Lo llevaron a cabo estudiantes del programa de ingeniería mecánica en el Laboratorio de Máquinas de Combustión Interna de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Se utilizó un motor monocilindro diesel marca *Ruggerini* **RY 110**.

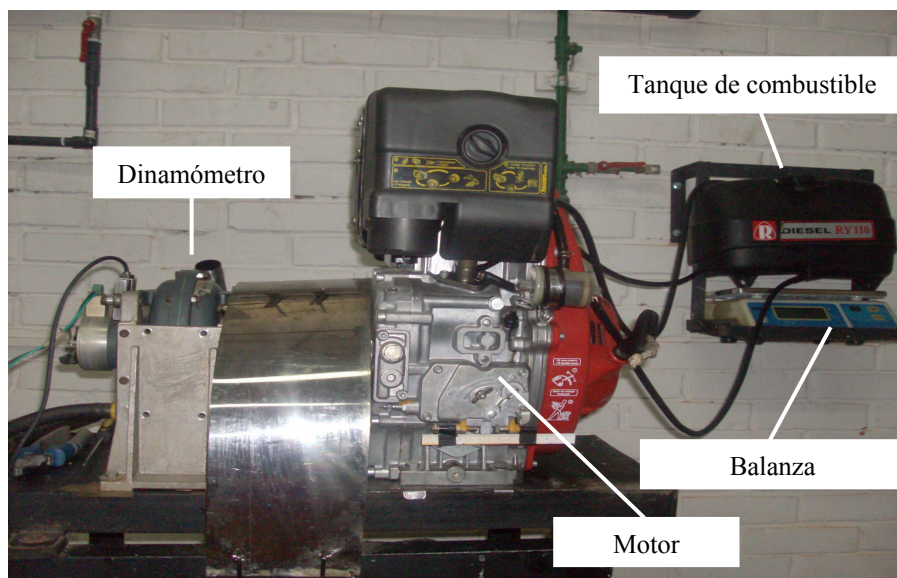


Figura 10. Banco de pruebas Diesel, [102].

Las pruebas se realizaron de acuerdo a la norma ICONTEC 1930 de 1996 y la norma ICONTEC 2016 de 1985, [105].

Durante las pruebas se empleó diesel puro y una mezcla de diesel – biodiesel con 20% en volumen de biodiesel.



## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1 Análisis de los residuos grasos

Las pruebas de los residuos grasos de carnicería se realizaron por triplicado y los resultados se presentan en la tabla 5.

**Tabla 5. Resultados de la caracterización de la materia prima**

Prueba	Ensayo	Promedio	Coefficiente variación (%)
<b>Humedad (%)</b>	39,09	39,43	2,02
	40,34		
	38,85		
<b>Extracto Etéreo (%)</b>	80,96	81,42	0,523
	81,50		
	81,80		
<b>Cenizas (%)</b>	0,524	0,520	2,75
	0,533		
	0,504		

La humedad encontrada fue del 39,43%, se puede considerar que es un buen resultado al compararla con la carne vacuna consumible, ya que esta tiene un porcentaje que oscila entre el 60 y el 80%, [111], es decir, que los residuos grasos trabajados tienen un contenido graso importante puesto que su contenido de humedad fue bajo.

El porcentaje de extracto etéreo fue del 81,42%, este corresponde a la cantidad de sustancia grasa en los residuos vacunos, este valor es alto si se considera que la grasa en la carne de res consumible representa entre un 10 y un 20%, [111, 112].

Con relación a otros estudios, se encontraron reportes de rendimiento de extracción del 80%, [113], valor similar al encontrado en las pruebas realizadas para los residuos grasos bovinos.

Con base en este análisis también se puede resaltar el residuo de extracción, ya que representa el 18,58%. Esta masa se puede emplear para otros propósitos, como por ejemplo para alimentación de animales.

El porcentaje de cenizas encontrado para los residuos bovinos fue del 0,520%, el cual es más bajo que el de la carne que es aproximadamente del 1%, [114], y al comparar con otros estudios que reportan un valor de cenizas de 0,57%, se puede decir que el valor obtenido esta dentro de los rangos esperados, [115].

El contenido de cenizas encontrado es bajo, y este es equivalente a un bajo contenido de minerales. Un valor alto de este parámetro indicaría problemas del aumento del residuo carbonoso y formación de jabones que colmatan los filtros del motor, [116].

Los coeficientes de variación de los diferentes parámetros de caracterización de la materia prima (2,75%, 0,5230% y 2,75%) están por debajo del 5% (5<: Muy bueno; 5 – 10: Bueno; 10 – 15: Aceptable; >15: No recomendado), indicando que son “muy buenos” y por ende que son precisos y repetibles.

## **7.2 Extracción de la grasa**

Se implementaron dos métodos de extracción, el método soxhlet y una extracción con agua a alta presión. En el primer caso se usó una relación n-hexano-grasa 5:1, obteniéndose un rendimiento de extracción del 81,42% (extracto etéreo). Sin embargo, a pesar de que el rendimiento es alto, la capacidad de materia a extraer en este método es limitada. La máxima cantidad de materia prima que se puede suministrar en un sistema de extracción de 1 L es aproximadamente 100 g, lo que hizo considerar otro sistema de extracción.

Con el segundo método se empleó agua caliente para la extracción y como equipo una olla a presión, se obtuvo un rendimiento de extracción del 48%. El método fue efectivo en el sentido en que se pudo someter a extracción una cantidad abundante de materia prima

(aproximadamente 2 Kg), por un tiempo de 2 horas y con una fácil separación. Se logró una extracción considerable de grasa.

No se encontraron estudios que implementaran el mismo sistema de extracción con agua directa y presión. Un estudio realizó una extracción con agua en ebullición, el cual estableció un rendimiento de extracción del 15,7%, [113], este valor es bajo en comparación al obtenido, lo que indica que la presión ejercida pudo ser el factor que incrementó la efectividad de la extracción.

### 7.3 Análisis físico-químico de la grasa extraída

Después de la extracción de la grasa se realizaron una serie de análisis físico-químicos con el fin de evaluar su calidad para ser empleada para la producción de biodiesel. Los resultados de estas pruebas se muestran en las tabla 6:

**Tabla 6. Resultados de los análisis físico-químicos de la grasa extraída**

Prueba	Ensayo	Promedio	Coeficiente variación (%)
<b>Índice de acidez (% ácido oléico)</b>	0,801	0,846	5,050
	0,886		
	0,850		
<b>Índice de saponificación (mg de KOH/g de grasa)</b>	186,80	190,17	1,759
	193,60		
	190,20		
<b>Índice de yodo (g I<sub>2</sub>/ 100 g de grasa)</b>	85,14	87,14	2,148
	88,85		
	87,43		
<b>Índice de peróxido (meq O<sub>2</sub>/Kg grasa)</b>	4,30	4,32	1,90
	4,41		
	4,25		
<b>Humedad (%)</b>	2,95	2,98	1,39
	3,03		
	2,97		

**Tabla 7. Resultados de los análisis físico-químicos de la grasa extraída (Continuación)**

<b>Prueba</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Promedio</b>	<b>Coefficiente variación (%)</b>
<b>Calcio (mg/Kg grasa)</b>	26,83	26,13	3,134
	26,33		
	25,23		
<b>Magnesio (mg/Kg grasa)</b>	7,720	7,405	4,430
	7,430		
	7,065		
<b>Fósforo (mg/Kg grasa)</b>	55,65	57,33	3,309
	59,39		
	56,94		
<b>Cloruros (mg/Kg grasa)</b>	187,9	190,7	1,835
	194,6		
	189,5		
<b>Sulfuros (mg/Kg grasa)</b>	11,72	11,52	5,204
	10,85		
	12,00		

La acidez expresada en porcentaje de ácido oleico encontrada experimentalmente fue 0,846%. Este valor permitió concluir que la materia prima obtenida de residuos grasos de origen bovino, no requería un pretratamiento o neutralización previa a la obtención de los metílestest; puesto que presentó un valor de acidez menor al 3%, es decir que no afecta la eficiencia de la conversión, [35].

El valor de acidez encontrado en la grasa obtenida de los residuos está dentro de los rangos reportados por otros estudios que emplean grasa bovina para la elaboración de biodiesel, reportando valores en un rango de 0,5 a 1%, [115, 117].

El índice de saponificación encontrado experimentalmente es 190,17 mg KOH/ g grasa. Otras investigaciones reportan valores para el sebo bovino de 196 mg KOH/ g muestra, [115] y 193 mg KOH/ g muestra, [117]. En la literatura se encuentra que el sebo bovino tiene un índice de saponificación entre 190 - 200 mg KOH/ g muestra, [118]. Con esto se puede ver que el valor de la muestra de sebo bovino se encuentra dentro de los valores

esperados.

El índice de yodo para la grasa extraída fue 87,14 g I<sub>2</sub>/ 100 g grasa, este valor es aceptable para la producción de biodiesel, ya que entre los requerimientos como materia prima para la producción de biodiesel, se encuentra que el índice de yodo tiene como máximo 160 g I<sub>2</sub>/ 100 g grasa, [116].

La prueba del índice de peróxido mostró un valor promedio de 4,32 meq O<sub>2</sub>/ 100 g grasa. Otro estudio reportó que el índice de peróxidos del sebo se encuentra en un rango entre 3 a 6,5 meq O<sub>2</sub>/ 100 g grasa, [115], lo que indica que el valor hallado en este estudio se encuentra dentro del rango establecido. Se debe tener en cuenta que este tipo de materia prima debe ser usada con rapidez ya que el valor del índice de peróxido puede aumentar con el tiempo, [119, 120].

La humedad encontrada (2,98%) es muy alta, considerando que otros estudios indican que cuando la humedad llega a 0,9% el rendimiento de los metilesteres durante la transesterificación alcalina disminuye de notablemente, [121], y para mejorar el rendimiento es recomendable realizar una transesterificación ácida previa a la transesterificación alcalina, [35]. Sin embargo, en este estudio se realizó directamente la transesterificación alcalina, obteniéndose un rendimiento que se puede considerar bueno y sin la formación de emulsiones. Es recomendable para próximos estudios buscar formas efectivas de secado para la grasa bovina o realizar ensayos experimentales para la transesterificación catalizada con un ácido.

En promedio se encontró que la grasa de res tiene un contenido de 26,13 mg Ca/Kg grasa. Se sabe que la cantidad de calcio debe ser mínima, ya que su presencia puede ocasionar atascos en los motores, [118]. Algunos parámetros europeos recomiendan que la materia prima para la producción de biodiesel debe tener como cantidad máxima de calcio 25 mg/Kg, [122]. El valor encontrado está ligeramente por encima, por lo cual se sugiere para próximos estudios buscar la forma de disminuir la concentración de este metal.

Como se muestra en la tabla 7, el contenido de magnesio encontrado en la grasa fue de 7,405 mg Mg/Kg grasa. Este valor se encuentra dentro de los límites permitidos de la materia prima para la obtención de biodiesel, que según parámetros los europeos el valor máximo es 10 mg/Kg, [122].

La cantidad de fósforo encontrada en la grasa bovina fue de 57,33 mg P/Kg grasa. Este valor está ligeramente por encima del tope establecido por los parámetros europeos (50 mg/Kg de grasa), [122] y se recomienda buscar métodos para disminuir su valor.

La cantidad de cloruros encontrada en la grasa bovina fue 190,7 mg Cl<sup>-</sup>/Kg grasa, la cual está muy por encima del valor máximo del parámetro europeo (10 mg Cl<sup>-</sup>/Kg), [122]. Se debe implementar un pretratamiento en la materia prima o en el biodiesel que permita su reducción, ya que la existencia de cloruros favorece la corrosión del motor diesel, [123].

La cantidad de sulfuros encontrada en el sebo bovino fue 11,52 mg S<sup>-2</sup>/kg de grasa. El método empleado para cuantificar la cantidad de sulfuros (método del azul de metileno) especifica que para poder trabajar ese método se debe tener un máximo de sulfuros de 20 mg/L o Kg, [82]. Como requerimiento de materia prima para la producción de biodiesel, los parámetros europeos recomiendan que el máximo sulfuros sea de 20 mg/Kg, [122]. El valor de sulfuros encontrado en la grasa bovina se encuentra dentro de los límites establecidos en el método y en los parámetros. La cantidad de sulfuros debe ser pequeña, ya que afecta tanto ambientalmente como en la oxidación de algunas partes del motor, [113].

Los resultados encontrados en las tablas 6 y 7 muestran coeficientes de variación de: 5,05%, 1,759%, 2,148%, 1,90%, 1,39%, 3,134%, 4,43%, 3,309%, 1,835%, 5,204% para los diferentes parámetros evaluados a la grasa de residuos vacunos; según la tabla 3 estos valores están entre “muy buenos y buenos”, lo que indica que los procedimientos realizados tienen alto grado precisión y repetibilidad.

#### 7.4 Análisis de proteínas del residuo de extracción

El resultado del análisis de proteínas realizado por triplicado al residuo de extracción se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 8. Determinación de proteínas en el residuo de extracción**

Prueba	Ensayo	Promedio	Coefficiente variación (%)
Proteínas (%)	9,90	11,32	12,86
	11,26		
	12,81		

Esta prueba realizada para la evaluación del residuo de extracción de los desperdicios grasos de carnicería, se hizo para analizar su empleo en la alimentación animal. Se encontró un valor proteínico del 11,32%. Al no encontrar un análisis de proteínas para el residuo de extracción de los residuos grasos bovinos, como comparación, la carne vacuna muy gorda tiene un contenido de proteínas del 14%, [124], lo que indica que el contenido de proteínas de la carne de residuos después de la extracción es alta.

Según la tabla 8 el coeficiente de variación para esta determinación fue 12,86%, el cual esta dentro del rango de aceptabilidad. La dispersión encontrada en los datos se puede explicar al considerar que se trabajo con residuos de desperdicios, lo que hace este material sea muy heterogéneo, ya que el contenido de sustancias nutritivas es generalmente variable y distintas muestras del mismo producto pueden diferir, [125].

#### 7.5 Obtención de biodiesel

El biodiesel se obtuvo por medio de transesterificación alcalina implementando el método descrito en la metodología.

Los catalizadores KOH y NaOH junto con el metóxido de sodio y el metóxido de potasio son los que investigaciones previas han descrito como los mejores catalizadores para la

transesterificación alcalina; siendo mejores los hidróxidos que los metóxidos ya que proporcionan mejores rendimiento de reacción. Además de que son más fácilmente disponibles. El catalizador utilizado fue KOH, debido a que este hidróxido se disuelve mejor en el metanol (alcohol utilizado) que el NaOH, [35].

La concentración trabajada del KOH en la grasa fue del 0,5%, debido a que estudios anteriores encontraron que con esta concentración se logra conversión del aceite en metílesteres sin formación excesiva de jabones, [29].

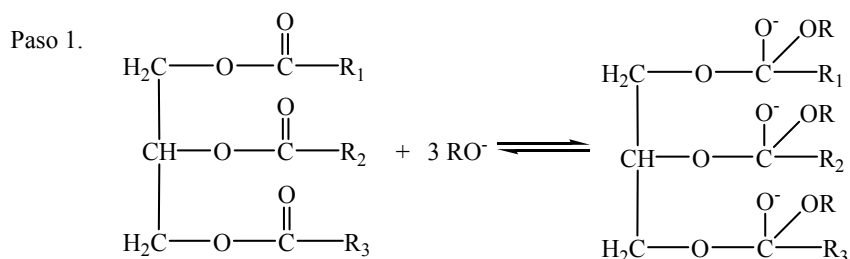
El uso del metanol favorece en el sentido de que el KOH se disuelve más fácil en él que en etanol, [12, 35]. Además la etanólisis forma emulsiones que son más estables y hacen más compleja la separación y purificación de los ésteres. En cambio las emulsiones en la metanólisis son rápidas y fácilmente descompuestas para formar una capa inferior rica en glicerol y una capa superior rica en metílesteres, [35].

Por otro lado, el metanol que se encuentra asociado con la glicerina puede ser recuperado. Se considera que al menos un cuarto del metanol empleado en la fabricación de biodiesel puede ser empleado nuevamente. La importancia de esto radica en que el metanol constituye cerca del 70 % de los costos de producción del biodiesel. La glicerina, principal subproducto generado en la reacción de transesterificación, puede ser neutralizada y comercializada para la fabricación de jabones u otros subproductos, [126].

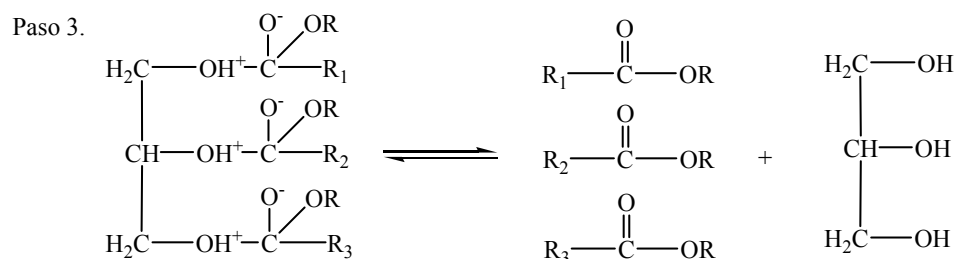
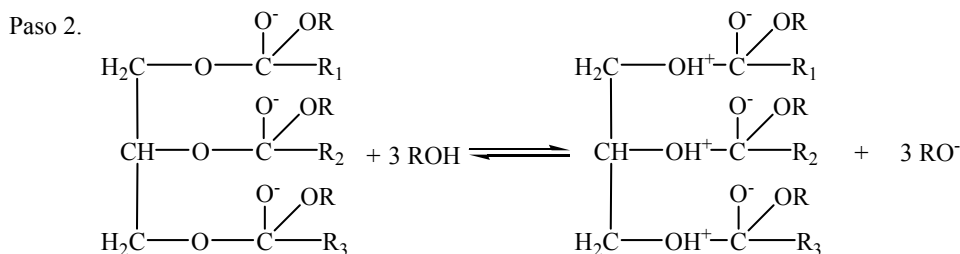
La relación estequiométrica de metanol-grasa para la formación de metílesteres es de 3:1, pero como es una reacción de equilibrio y con el fin de favorecer la formación de metílesteres, estudios anteriores han demostrado que se logra la máxima conversión cuando se trabaja con una relación molar metanol-grasa de 6:1, [35], por lo tanto se trabajo de acuerdo a esta última relación molar.



En el proceso de alcoholólisis, el catalizador, ya sea de hidróxido de sodio o hidróxido de potasio se disuelve primero en el alcohol, en el que los triglicéridos posteriormente se adicionan para poder reaccionar, [35]. En la figura 11 se muestra el mecanismo de reacción.



Trigliceridos



Ésteres

Glicerina

Figura 11. Mecanismo de reacción de una transesterificación alcalina, [35].

Mantener la agitación durante la transesterificación es muy importante porque las grasas son inmiscibles con la solución hidróxido – metanol, [35, 127], por esta razón se mantuvo agitación constante durante todo el proceso de reacción.

Estudios han encontrado que la transesterificación con metanol del sebo bovino es muy lenta durante los primeros minutos y el rendimiento aumenta con el tiempo, [128]. Se ha encontrado que el tiempo de reacción adecuado para la transesterificación del sebo bovino con el fin de garantizar su transformación debe ser de 1 hora, [117], debido a esto se trabajó con este tiempo de reacción.

La temperatura influye en la velocidad de reacción y el rendimiento de los ésteres, [35], para el uso de grasa bovina estudios previos dicen que la temperatura se debe manejar alrededor de 65°C, por lo cual se trabajó con un rango de temperatura de 65 – 70°C con el fin de no disminuir la temperatura de 65°C, [4].

El rendimiento de reacción obtenido fue del 93%; se encontró un estudio que obtuvo un porcentaje de conversión del 91%, [117], otro trabajo diferente reporta rendimientos mayores o iguales a 92%, [127], estos valores guardan semejanza o cercanía al porcentaje de rendimiento obtenido.

## 7.6 Análisis físico-químico del biodiesel obtenido

Después de la reacción de transesterificación realizada con la metodología especificada, los resultados de los análisis de calidad del biodiesel de las propiedades físicas y químicas encontraron lo siguiente:

**Tabla 9. Resultados de los análisis físico-químicos del biodiesel**

Prueba	Resultado	Promedio	Coficiente Variación (%)
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,8653	0,8652	0,053
	0,8647		
	0,8656		
<b>Índice de refracción</b>	1,4481	1,448	0,012
	1,4481		
	1,4478		

**Tabla 10. Resultados de los análisis físico-químicos del biodiesel (continuación)**

Prueba	Resultado	Promedio	Coefficiente Variación (%)
<b>Viscosidad cinemática (mm<sup>2</sup>/s)</b>	6,26	6,12	1,94
	6,13		
	5,97		
<b>Punto de inflamación (°C)</b>	174,0	173,7	0,332
	173,0		
	174,0		
<b>Poder Calorífico (KJ/Kg)</b>	39033,5	36947,4	5,596
	36909,9		
	34899,0		
<b>Humedad (%)</b>	0,231	0,236	1,99
	0,241		
	0,236		
<b>Índice de yodo (g I<sub>2</sub>/ 100 g de grasa)</b>	51,01	50,60	1,130
	50,85		
	49,95		

No fue posible determinar la densidad a 15°C como especifica la norma ASTM D4052 (rango permitido: 0,860 – 0,900 g/cm<sup>3</sup>), [82], ya que el biodiesel bovino obtenido se solidificó a 15 °C, por lo tanto el biodiesel obtenido no cumple la norma. Se determinó la densidad a la temperatura ambiente de Pereira (23 °C), obteniendo como resultado 0,8652 g/cm<sup>3</sup>. Se recomienda la evaluación del biodiesel en mezcla, ya que estudios han demostrado que la densidad se puede regular si trabaja el biodiesel en mezcla con diesel, [29] y la opción de utilizar el biodiesel bovino en zonas de climas cálidos.

El índice de refracción se determinó a 20 °C, y en promedio se encontró un valor de 1,4480. El valor encontrado está próximo a un reporte de grasa animal, el cual proporciona un valor de 1,446, [129].

La viscosidad cinemática encontrada fue de 6,12 mm<sup>2</sup>/s a 40 °C como especifica la norma ASTM D445. El rango establecido en esta norma es de 1,9 – 6,0 mm<sup>2</sup>/s, [89], por lo tanto el biodiesel bovino obtenido al estar ligeramente por encima del límite superior incumple la

norma.

El valor de la viscosidad puede mejorar si se manejan mezclas de biodiesel-diesel, [29], por esta razón se recomienda a estudios posteriores evaluar la variación y aceptación de la viscosidad realizando mezclas con diesel de petróleo u otros tipos de biodiesel.

El punto de inflamación obtenido fue de 173,7 °C, el cual se encuentra dentro de la norma ASTM D93, ya que según esta norma el valor mínimo es 120 °C, [93], esto indica que el biodiesel obtenido brinda una seguridad adecuada, por lo que se puede manipular sin problemas, [116].

El poder calorífico encontrado para el biodiesel bovino fue 36947,4 KJ/Kg. El valor inferior reportado en la norma ASTM D240 indica que debe estar alrededor de 39500 KJ/Kg, [94], por lo tanto el valor encontrado está próximo (6,46% por debajo) del valor descrito en la norma.

Otro biodiesel realizado a partir de residuo graso de origen animal tiene un poder calorífico de 38765 KJ/Kg, [130], este biodiesel y el producido en este proyecto se encuentran cercanos (difieren el 6,7%), por lo cual el poder calorífico encontrado es aceptable.

El índice de yodo del biodiesel con respecto a la grasa disminuyó, por lo que se puede decir, que en el proceso de esterificación se rompieron algunos enlaces, y como consecuencia los metilesteres obtenidos tienden a oxidarse con menos facilidad que la grasa, [116].

El biodiesel obtenido presentó un índice de yodo de 50,60 g I<sub>2</sub>/100 g. Según la norma EN 14111 el valor máximo de este parámetro es 120 g I<sub>2</sub>/100 g, [78], por lo tanto el valor encontrado está por debajo del valor límite exigido en la norma.

Otros estudios reportan índices de yodo para el biodiesel de grasa de cerdo de 77 g I<sub>2</sub>/100 g, [128], biodiesel de grasa de pollo de 130 I<sub>2</sub>/100 g y biodiesel de grasa de cordero de 126 g I<sub>2</sub>/100 g, [125], estos últimos no cumplen la norma. Estos valores indican la estabilidad del biodiesel bovino en este parámetro.

El contenido de humedad del biodiesel bovino fue del 0,236%. Según la norma ISO 12937 el contenido máximo de agua es de 0,05%, [78], lo que indica que el valor obtenido está muy por encima de lo establecido en la norma. Un alto contenido de agua favorece problemas como la corrosión y el crecimiento de microorganismos en el motor, [22], por esta razón se recomienda para próximos estudios buscar una forma eficiente para el secado del biodiesel.

El coeficiente de variación de cada prueba (0,053%, 0,012%, 1,94%, 0,332%, 5,596%, 1,13% y 1,99%) muestra que los resultados de los métodos realizados para el biodiesel son confiables.

Se realizaron tres pruebas cuyos resultados son cualitativos, los resultados son los siguientes:

- **Corrosión de la lámina de cobre**

Esta prueba cualitativa se llevo a cabo por triplicado, y en los tres casos se observó el mismo resultado: 1b, el cual hace parte del nivel de corrosión más bajo.

El biodiesel de aceite de palma y de frituras también se encuentran en el nivel de corrosión 1, [31, 132], lo que indica que en general el biodiesel presenta corrosión mínima.

En la norma ASTM D130 el valor máximo admitido es el número 3, por lo tanto, el biodiesel bovino producido es aceptable, ya que este producto no contiene compuestos corrosivos ni ácidos que puedan atacar el cobre o aleaciones de este que se encuentran en el

motor, [116].

- **Apariencia**

Después de la observación realizada según el procedimiento 1 de la norma ASTM D4176, se encontró que al apreciar el biocombustible fabricado estaba desprovisto de agua, por lo cual se observó una evidente claridad y transparencia.

El resultado se reportó como “limpio y brillante”, y este es el resultado que debe ser encontrado para que el biodiesel sea de buena calidad, [133].

- **Color**

Según la norma ASTM D1500, el reporte del biodiesel después del lavado con agua es: L4 ASTM color, el cual significa que el color del biodiesel se encuentra entre el patrón 3 y 4.

Lo que se encontró en el biodiesel después de ser lavado con Biosil G fue: L3 ASTM color, es decir, que este biodiesel se encuentra entre el patrón de color 2 y 3.

De esta manera se puede ver que con la limpieza por el biosil G se mejoró la calidad del biodiesel obtenido, ya que en cuanto más se acerque el biodiesel a color amarillo, este es de mejor calidad, y en cuanto más se aleje de él, mayor es el contenido de glicéridos y ácidos grasos, [135]. Es recomendable seguir empleando el biosil G en futuros trabajos.

## 7.7 Análisis de cromatografía de gases

### 7.7.1 Identificación de metilesteres en el biodiesel bovino obtenido

La muestra de biodiesel presentó 16 picos bien definidos (figura 12) los cuales fueron identificados mediante la comparación de los tiempos de retención del estándar empleado (RESTEK 35078) y a partir de los espectros de masas (anexo B). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 11.

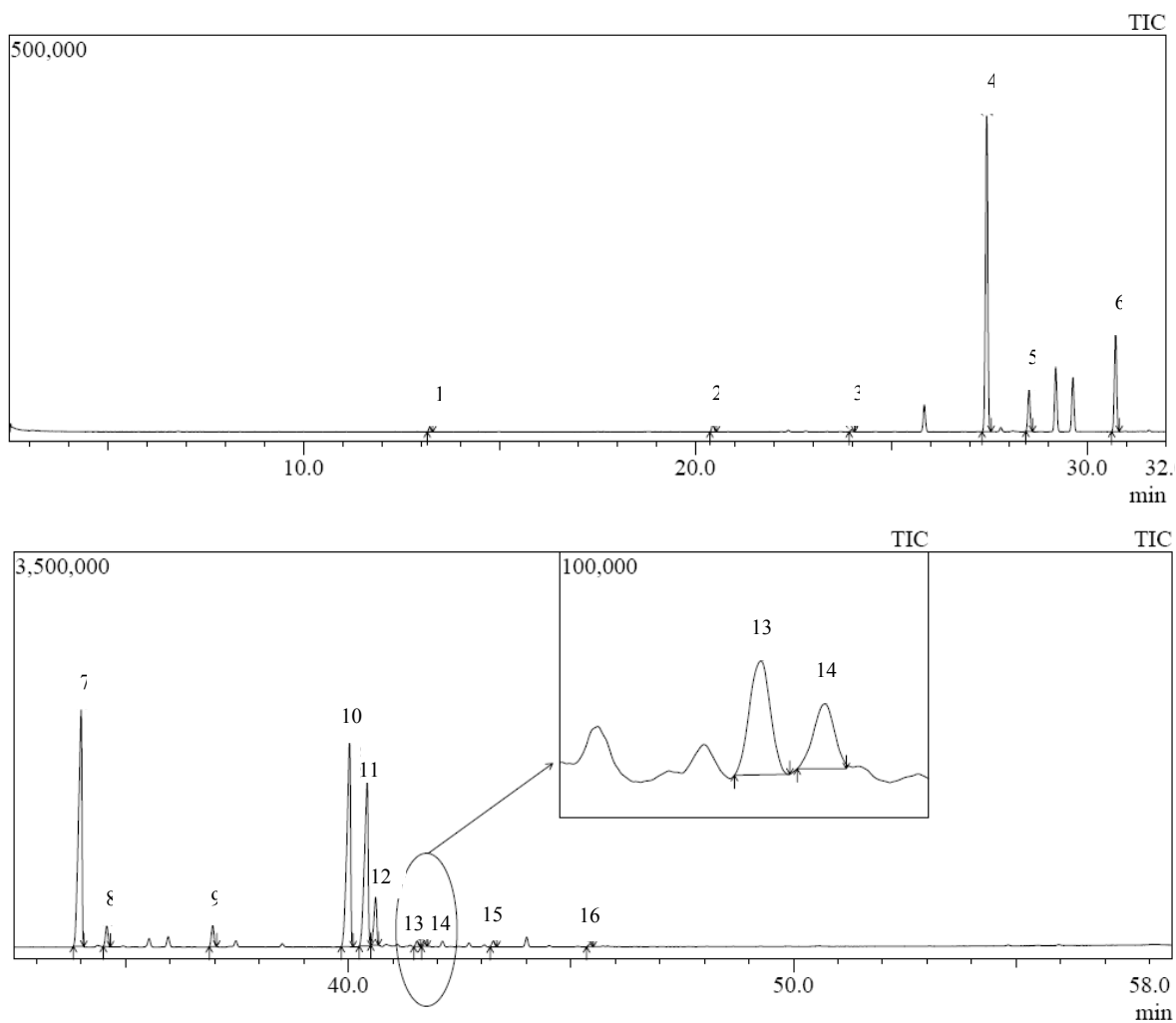


Figura 12. TIC obtenido por cromatografía de gases de la muestra de biodiesel bovino

**Tabla 11. Resultados de cromatografía de gases para el biodiesel bovino**

Compuesto	Pico	t <sub>R</sub>	%Área
Decanoato de metilo	1	13,223	0,10
Laurato de metilo	2	20,452	0,19
Tridecanoato de metilo	3	23,995	0,04
Miristato de metilo	4	27,436	6,07
Miristoleato de metilo	5	28,513	0,76
Pentadecanoato de metilo	6	30,722	1,84
Palmitato de metilo	7	34,000	40,83
Palmitoleato de metilo	8	34,573	0,88
Heptadecanoato de metilo	9	36,957	2,77
Estearato de metilo	10	40,030	34,81
Oleato de metilo	11	40,427	8,11
Elaidato de metilo	12	40,415	2,23
Linoelidato de metilo	13	41,545	0,32
Linolaidato de metilo	14	41,705	0,06
Linolenato de metilo	15	43,255	0,65
Arachidato de metilo	16	45,427	0,34

Los resultados muestran que los ácidos grasos del sebo bovino fueron satisfactoriamente esterificados. Los componentes mayoritarios según el área son los picos 7 y 10 identificados como palmitato de metilo y estearato de metilo respectivamente. Seguidos por los picos 11 y 4 identificados como oleato de metilo y miristato de metilo. El componente minoritario es el representado por el pico 3 (tridecanoato de metilo). Según un análisis de cromatografía de gases para la grasa bovina, la composición encontrada en el biodiesel es similar a la de la grasa, indicando que no hubo degradación o transformaciones alternas considerables paralelas a la transesterificación.

Según datos de la literatura se encontró que el ácido graso mayoritario en el sebo bovino es el ácido oleico seguido por el ácido palmítico y el esteárico, [50]. Lo que indica que la grasa bovina de la que se partió presentó un grado de deterioro (disminución de ácidos grasos insaturados), por lo cual su composición con respecto a la teórica varió.

De los compuestos identificados en el biodiesel bovino, el 87% corresponde a compuestos



saturados y el 13% a compuestos insaturados.

La alta cantidad de compuestos saturados y el aumento de la longitud de la cadena esta relacionada con el aumento en la viscosidad, [55], lo cual explica la alta viscosidad encontrada y el pobre comportamiento a bajas temperaturas del biodiesel producido; aunque aun los tipos de biodiesel más insaturados (metilésteres de los aceites de colza, soya y girasol) presentan un desempeño a bajas temperaturas muy inferior al del combustible diesel convencional, [134].

Los compuestos insaturados también se relacionan con la viscosidad, los dobles enlaces cis reducen la viscosidad, mientras que los dobles enlaces trans tienen menos efecto sobre la viscosidad en comparación con los compuestos saturados con un número igual de átomos de carbono, [135].

Se recomienda para próximos estudios evaluar las proporciones de mezcla del biodiesel bovino con diesel u otro tipo de biodiesel menos viscoso, con el fin de mejorar las propiedades de fluidez.

El tipo de análisis cromatográfico realizado permitió la identificación de los metilesteres por los tiempos de retención y por los principales fragmentos del espectrómetro de masas de los metilesteres del estándar empleado (RESTEK 35078). Los picos presentes en el TIC que no identificados requieren de un nuevo análisis cromatográfico en modo SCAN (modo de barrido total del espectro) que permite comparar el espectro de masas del compuesto presente con el de la biblioteca (Wiley, 7<sup>o</sup> edición, 2003) del equipo, para así establecer la naturaleza química y mayor información de estos compuestos, [136].

## 7.8 Ensayo del biocombustible en motor diesel

Tanto las pruebas como los análisis de resultados se realizaron por estudiantes del programa de ingeniería mecánica en el Laboratorio de Máquinas de Combustión Interna de la Universidad Tecnológica de Pereira. El motor que se que se trabajó es un motor monocilindro diesel italiano marca *Ruggerini RY 110*, en el anexo E se encuentran las especificaciones del motor y en el anexo F se muestra gráficamente los resultados proporcionados por el fabricante del motor. Las pruebas realizadas por el fabricante del motor fueron desarrolladas con diesel del país de fabricación (Italia) y el diesel empleado en estas pruebas es nacional con especificaciones diferentes. Las aplicaciones de este motor son: tractor de dos ruedas, podadora agrícola, bomba agrícola, hidrolimpiadora de alta presión, grupo electrógeno, placa vibrante, paquete de energía hidráulica.

Las muestras empleadas durante las pruebas fueron: diesel fósil (procedente de la región risaraldense) y una mezcla de biodiesel – diesel al 20% en volumen de biodiesel. En el anexo G se encuentran los datos encontrados en las pruebas realizadas al diesel y a la mezcla de diesel – biodiesel. Los resultados de los cálculos de torque, potencia y consumo específico de combustible para cada una de las pruebas se muestran en el anexo H.

Con la ayuda de los datos encontrados y de los datos proporcionados por el fabricante del motor fue posible realizar una comparación en cuanto a su funcionalidad mecánica y posteriormente se realizó una comparación en cuanto emisión ambiental entre las dos muestras de combustible.

De cada muestra de combustible (diesel y mezcla diesel – biodiesel) se realizaron dos pruebas, las cuales se trataron de llevar a cabo a las mismas condiciones, cosa que no fue posible debido a las limitaciones del montaje disponible para las pruebas (por ejemplo: no pudo fijarse un valor de rpm para realizar una comparación precisa con los valores reportados por el fabricante del motor).

A las muestras de diesel puro se les denominó DIESEL, como fueron dos ensayos a cada uno se le denominó 1 y 2, y a las mezclas de diesel con biodiesel al 20% se les denominó BIODIESEL (1 y 2). En las graficas y tablas aparece la respectiva comparación con los resultados dados por el fabricante del motor.

### 7.8.1 Torque

El torque es la fuerza que producen los cuerpos en rotación, el motor produce fuerza en un eje que se encuentra girando, [58].

En la siguiente tabla se muestran los resultados generales, en donde se expresan los valores mínimos y máximos encontrados durante las pruebas comparadas con los datos reportados por el fabricante del motor:

**Tabla 12. Torques mínimos, máximos y registros de torque del fabricante según RPM de los torques máximos y mínimos de DIESEL 1 y 2 y BIODIESEL 1 y 2**

<b>Combustible</b>	<b>Torque mínimo(N-m)</b>	<b>Torque mín. registro RPM fabric.(N-m)</b>	<b>Torque máximo(N-m)</b>	<b>Torque máx. registro RPM fabric.(N-m)</b>
<b>Fabricante</b>	19,41@3600rpm	-	23,43@2100rpm	-
<b>Diesel 1</b>	14,4@1751rpm	22@1751rpm	15,20@2434rpm	23,2@2434rpm
<b>Diesel 2</b>	14,7@2651rpm	22,5@2651rpm	15,10@2227rpm	23,39@2227rpm
<b>Biodiesel 1</b>	14,4@1762rpm	22,2@1762rpm	15,10@1702rpm	21,75@1702rpm
<b>Biodiesel 2</b>	14,5@1622,5rpm	21,36@1622,5rpm	15,10@1641rpm	21,38@1641rpm

En la figuras 13 y 14 se muestran las gráficas que representan los valores mínimos y máximos de torque encontrados para cada tipo de combustible, con el fin de realizar una comparación entre ellos y entre el fabricante del motor:

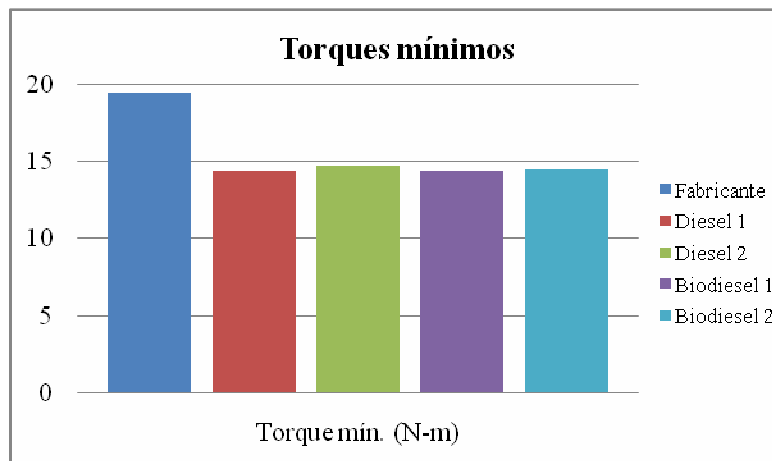


Figura 13. Comparación de torques mínimos entre los datos reportados por el fabricante del motor y los resultados de las muestras de diesel y biodiesel-diesel

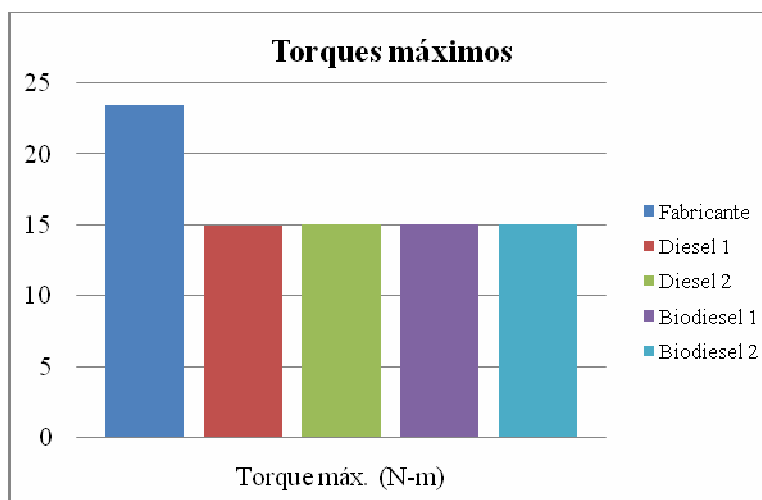


Figura 14. Comparación de torques máximos entre los datos reportados por el fabricante del motor y los resultados de las muestras de diesel y biodiesel-diesel

Hay que tener en cuenta que tanto el montaje, las condiciones y limitantes del mismo, como el tipo de calidad de diesel trabajado son muy diferentes a las del fabricante del motor diesel (óptimas condiciones), por lo tanto desde el inicio se esperaban valores inferiores a las del fabricante, lo que se evidenció tanto en los torques mínimos (disminución del 25%) como en los torques máximos (disminución del 35%) encontrados.

Al observar los datos dados por el fabricante del motor se puede decir que el torque no cambia significativamente con la variación de las RMP, aunque los resultados tanto para el diesel como para las mezclas con biodiesel mostraron torques por debajo a las del fabricante, ambas muestras, tanto para los torques mínimos como para los torques máximos tienen un comportamiento similar al dado por el fabricante, por lo cual se tiene repetibilidad y confianza en los datos encontrados. Las mezclas de biodiesel bovino al 20% en diesel fósil tienen valores aceptables de torque en el sentido en que se encontraron valores muy próximos entre el diesel puro y la mezcla con biodiesel.

### 7.8.2 Potencia

La potencia indica la rapidez con que puede trabajar el motor, [57]. Los resultados de potencia se resumen en la tabla 13 y en las figuras 15 y 16:

**Tabla 13. Potencias mínimas y máximas y registros de potencia del fabricante según RPM de las potencias máximos y mínimos del DIESEL 1 y 2 y BIODIESEL 1 y 2**

Curva	Potencia mínima (kw)	Potencia mín. Registro RPM fabric.(kw)	Potencia máxima (kw)	Potencia máx. Registro RPM fabric.(kw)
<b>Fabricante</b>	3,58@1600rpm		7,3@3600rpm	
<b>Diesel 1</b>	2,00@1244,5rpm	N.A@1244,5rpm	5,11@3112,0rpm	6,82@3112,0rpm
<b>Diesel 2</b>	2,24@1269,5rpm	N.A@1269,5rpm	5,07@3105,0rpm	6,80@3105,0rpm
<b>Biodiesel 1</b>	1,97@1215rpm	N.A@1215,0rpm	2,90@1663,5rpm	3,70@1663,5rpm
<b>Biodiesel 2</b>	2,00@1258,5rpm	N.A@1258,5rpm	2,77@1761,0rpm	4,08@1761,0rpm

N.A: no aplica, ya que las revoluciones registradas son menores a las mínimas registradas por el fabricante (1600 RPM).

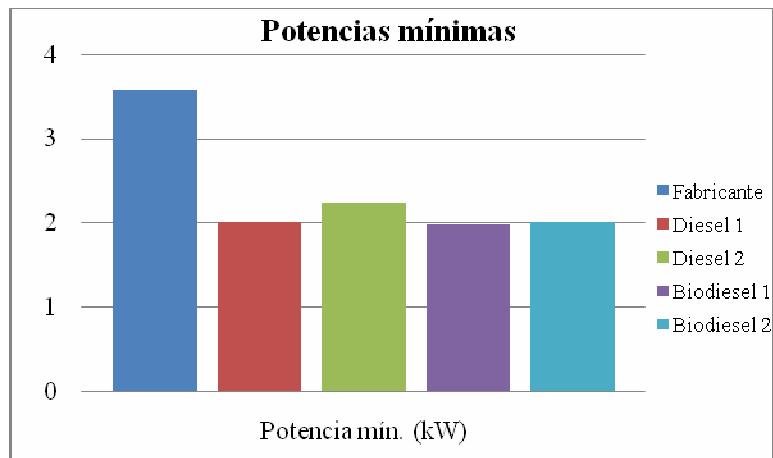


Figura 15. Comparación de potencias mínimas entre los datos reportados por el fabricante del motor y los resultados de las muestras de diesel y biodiesel-diesel

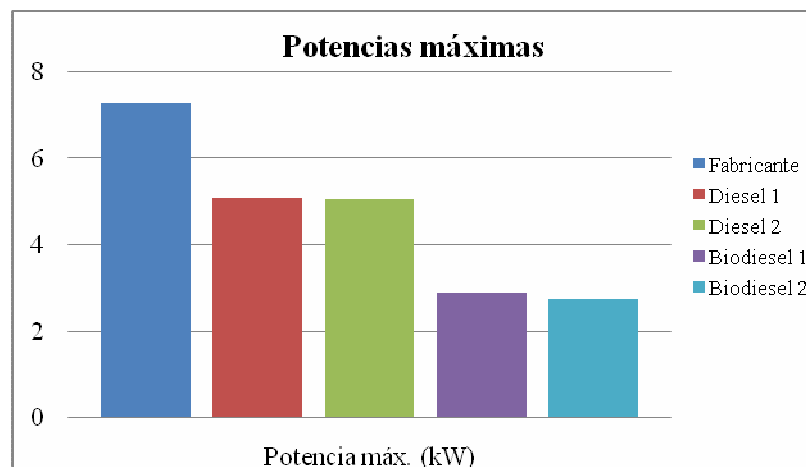


Figura 16. Comparación de potencias máximas entre los datos reportados por el fabricante del motor y los resultados de las muestras de diesel y biodiesel-diesel

Las potencias mínimas de los dos tipos de combustibles empleados tienen cerca del 25% de diferencia con respecto al dato dado por el fabricante, factor que se puede atribuir a las condiciones limitadas del montaje de experimentación. Sin embargo, no se observan

diferencias entre los dos tipos de combustibles y el resultado hallado en cada prueba muestra al igual que el fabricante poca variación en el valor de la potencia.

Para las potencias máximas se encontraron diferencias marcadas: en las muestras de diesel con respecto a la del fabricante un 30%, y las referentes a las muestras de biodiesel un 61% frente al fabricante; por lo cual la potencia máxima de las mezclas de biodiesel cayeron el 44% del valor proporcionado por las muestras de diesel puro. La potencia no sufrió una variación considerable con pequeños cambios de RPM, encontrándose un comportamiento similar en los datos reportados por el fabricante.

La disminución de la potencia se puede relacionar con el poder calorífico, y según los resultados obtenidos el del biodiesel fue menor que el del diesel. La viscosidad del combustible también esta relacionada con la potencia, ya que debido a esta, el flujo puede variar por la fricción con la tubería, aumentando las pérdidas. Debido a esto es probable que la potencia del motor disminuya con el uso del biodiesel con relación al diesel.

Al encontrar unos valores tan bajos de potencias máximas para las mezclas de biodiesel al 20%, es recomendable para próximos estudios evaluar el comportamiento de diversas mezclas de biodiesel con diesel por ejemplo por debajo del 20%, para observar si se logra un mejor comportamiento en el motor.

### **7.8.3 Consumo específico de combustible**

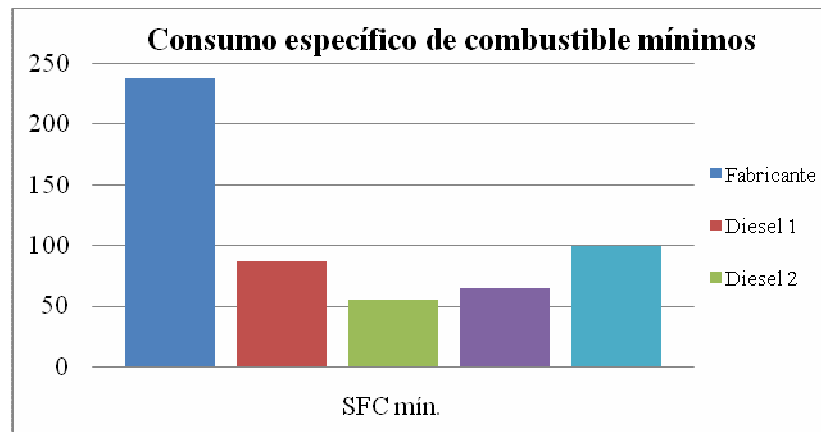
Consumo específico de combustible es la cantidad de combustible que necesita un motor para suministrar una determinada unidad de potencia por unidad de tiempo, [58]. En la tabla 14 se encuentran los resultados de los consumos específicos mínimos y máximos dados por los combustibles diesel y la mezcla diesel – biodiesel en el motor diesel:

**Tabla 14. Consumos específicos de combustible mínimos y máximos y registros de consumo específico del fabricante según RPM de los consumos específicos máximos y mínimos del DIESEL 1 y 2 y BIODIESEL 1 y 2**

Combustible	SFC mínimo (g/kW*h)	SFC MÍN. registro RPM fab. (g/kW*h)	SFC máximo (g/kW*h)	SFC MÁX. registro RPM fab. (g/kW*h)
<b>Fabricante</b>	237,40@2600rpm		258,00@3600,0rpm	
<b>Diesel 1</b>	86,26@1798,0rpm	248,0@1798,0rpm	283,29@2288,5rpm	239,5@2288,5rpm
<b>Diesel 2</b>	54,51@1820,5rpm	247,0@1820,5rpm	264,66@1742,0rpm	249,0@1742,0rpm
<b>Biodiesel 1</b>	64,10@1691,5rpm	249,7@1691,5rpm	351,12@1193,0rpm	N.A@1193,0rpm
<b>Biodiesel 2</b>	99,55@1680rpm	249,5@1680rpm	366,97@1254,5rpm	N.A@1254,5rpm

N.A: no aplica, ya que las revoluciones registradas son menores a las mínimas registradas por el fabricante (1600 RPM).

De la tabla anterior se tomaron los valores de consumo específico para realizar una comparación visual entre los valores dados por cada prueba de combustible y el fabricante:



**Figura 17. Comparación de consumo específico de combustible mínimos entre los datos reportados por el fabricante del motor y los resultados de las muestras de diesel y biodiesel-diesel**



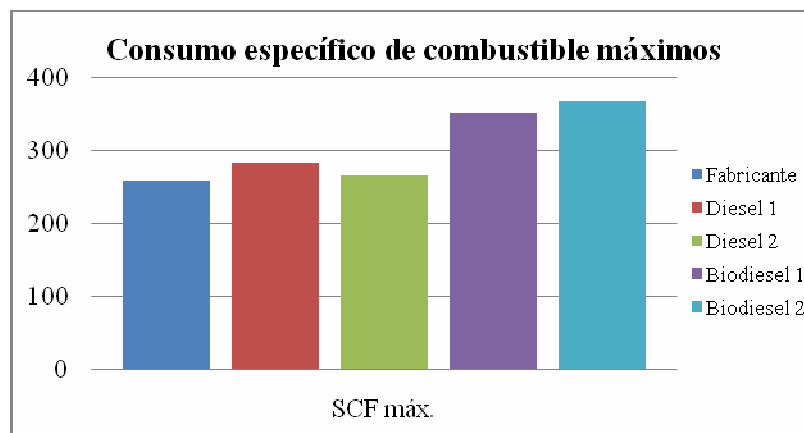


Figura 18. Comparación de consumo específico de combustible máximos entre los datos reportados por el fabricante del motor y los resultados de las muestras de diesel y biodiesel-diesel

Según los datos del fabricante del motor los consumos específicos no cambian de manera significativa con la variación de las RPM, ya que estas tienden a mantener sus valores, sin embargo, las determinaciones realizadas en el laboratorio de mecánica para el consumo específico mínimo oscilaron considerablemente para cada combustible empleado, es así como para las mediciones de DIESEL 1 y 2 los datos están de 86,26 g/kW\*h (1988,0 rpm) a 54,51 g/kW\*h (1820,5 rpm), cuando para las mismas, los datos de RPM del fabricante reportan prácticamente el mismo valor de 248,0 RPM. Esto indicaría una alta dispersión en esta medición que no permitiría una comparación válida con los datos del fabricante. De igual manera pasa con los datos del BIODIESEL 1 y 2, ya que son muy heterogéneos. Por lo tanto no es posible concluir en cuanto a la diferencia entre los dos combustibles en este motor, pero sí con relación a los combustibles empleados, ya que el valor de consumo específico mínimo está muy por debajo del valor esperado.

En cuanto al consumo máximo, se aprecia una tendencia a mantenerse el valor en ambos combustibles indicando en este caso que la medición es confiable. Se encuentra un mayor consumo específico de combustible máximo para el biodiesel que para el diesel, esto está directamente relacionado con el valor de la potencia, la cual disminuyó en términos de potencia máxima con el uso de biodiesel con relación al diesel alrededor de un 44%. Ambas

propiedades se ven afectadas por las diferencias existentes en los combustibles en cuanto a poder calorífico (menor en el biodiesel) y viscosidad (mayor en el biodiesel).

Seria necesario evaluar la aplicación del biodiesel en mezclas menores al 20% con relación al diesel para establecer si las propiedades mecánicas mejoran, puesto que en términos de eficiencia del motor si seria recomendable un menor consumo de combustible para lograr valores en las propiedades un poco más próximas a las establecidas por el fabricante.

#### 7.8.4 Opacidad

La opacidad es la capacidad que tienen las emisiones de gases de oponerse al paso de un haz de luz a una frecuencia determinada, [59]. En la siguiente tabla se muestran los resultados de opacidad encontrados para el diesel y el biodiesel:

**Tabla 15. Opacidades máximas y mínimas del DIESEL 1 y 2 y BIODIESEL 1 y 2**

<b>Combustible</b>	<b>Opacidad min. (%)</b>	<b>Opacidad máx. (%)</b>
<b>Diesel 1</b>	55@1798,0rpm	70@2434,0rpm
<b>Diesel 2</b>	62@1758,5rpm	84@2651,0rpm
<b>Biodiesel 1</b>	50@1691,5rpm	65@1280,0rpm
<b>Biodiesel 2</b>	40@1761,0rpm	66@1313,5rpm

En las siguientes figuras se hace una comparación visual entre las diferencias de opacidad entre ambos tipos de combustibles:

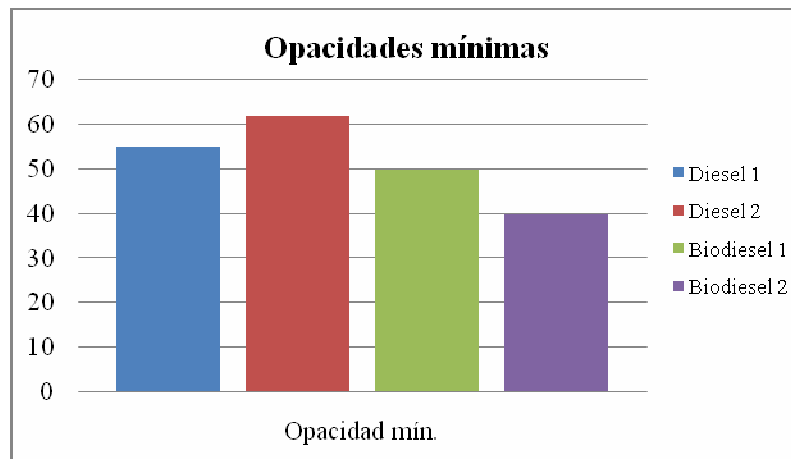


Figura 19. Comparación de opacidades mínimas entre los resultados de las muestras de diesel y biodiesel-diesel

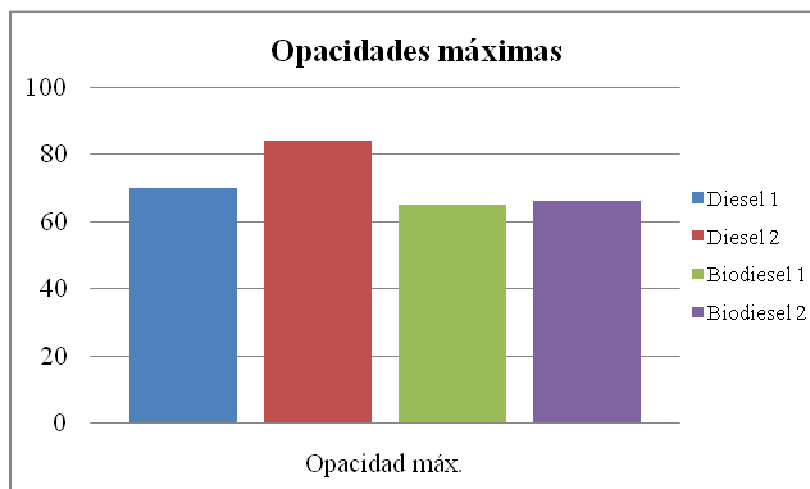


Figura 20. Comparación de opacidades máximas entre los resultados de las muestras de diesel y biodiesel-diesel

Con la tabla y las figuras anteriores se puede analizar la opacidad que se obtiene en las diferentes pruebas, siendo mayor en los casos de DIESEL 1 y 2 frente a los resultados de BIODIESEL 1 y 2; desde este punto de vista podría decirse que el diesel tiene mayores emisiones contaminantes y que la implementación de biodiesel para mezclas en diesel si tiene efecto en la disminución en la opacidad de las emisiones del motor.

Las opacidades máximas de BIODIESEL 1 y 2 guardan cercanía, por lo que puede decirse que hay una repetibilidad en los datos. En los demás casos no se observa una tendencia a mantenerse en los datos, lo cual indica que no hay una repetibilidad en la medición.

La normatividad colombiana estipula un porcentaje de opacidad máximo del 30% para el año 2006 y el límite máximo del 20% para el año 2011, según lo cual se puede decir que el motor Ruggerini RY 110 con los combustibles diesel y biodiesel trabajados no se cumplen los estándares exigidos por el Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, [105].

El biodiesel con el cual trabajaron en el Laboratorio de Maquinas de Combustión Interna estuvo guardado alrededor de 5 meses (almacenado en un envase ámbar en un salón oscuro a temperatura ambiente (23°C)). Esto ocurrió debido a problemas que tuvieron con el montaje en el que se realizaron las pruebas, por esta razón se evidenció un desempeño poco favorable dado por el biodiesel, ya que este es un compuesto orgánico que se degrada con el tiempo. Este comportamiento se comprobó en el momento de realizarse la prueba del poder calorífico, ya que como inicialmente se presentaron problemas para realizarse esta prueba, los primeros análisis se efectuaron a un biodiesel que llevaba por lo menos tres meses después de su producción, encontrando un resultado de 28860,7 KJ/ Kg. Al considerar el tiempo que llevaba la muestra y el bajo poder calorífico hallado se decidió volver a realizar las pruebas a un biodiesel recién producido, dando un valor promedio de 36947,4 KJ/ Kg, un valor considerablemente más alto que el inicial. Esto también puede estar relacionado con el pobre comportamiento del biodiesel en el motor. Por lo tanto es recomendable para posteriores estudios realizar un análisis de estabilidad del biodiesel bovino.

## 8. CONCLUSIONES

- La obtención de biodiesel a partir de residuos grasos bovinos fue satisfactoria, ya que la materia prima presentó aspectos favorables y la mayoría de las propiedades físico-químicas de los metilesteres cumplen los rangos de las normas ASTM D6751.
- Los análisis de los residuos cárnicos demostraron que su empleo es provechoso, ya que tanto su humedad (39,43%) como el extracto etéreo (81,42%) muestran que son materias con alto contenido de grasa.
- Los análisis de la grasa extraída mostraron que este tipo de materia prima tiene cualidades como: un índice de acidez del 0,846% expresado como ácido oleico que indicó que la materia prima no necesitaba un pretratamiento o neutralización para realizar la transesterificación alcalina; un índice de saponificación (190,17 mg KOH/g grasa) similar a otros estudios y a la literatura; un índice de yodo (87,14 g I<sub>2</sub>/100 g grasa) que concuerda a las recomendaciones europeas; un índice de peróxido (4,32 meq O<sub>2</sub>/Kg grasa) aceptable; el contenido de humedad (2,98%) de la grasa no interfirió con la formación de jabones durante la reacción, sin embargo, debe considerarse su secado ya que este factor puede deteriorar su calidad o experimentar con una transesterificación ácida previa a la transesterificación alcalina; el contenido de magnesio (7,41 mg Mg/Kg) y de sulfuros (11,52%) se encontraron dentro de los valores aceptables; pero la cantidad de calcio, fósforo y cloruros (26,13 mg Ca/Kg, 57,33 mg P/Kg, 190,7 mg Cl<sup>-</sup>/Kg) dieron superior a lo recomendado, por lo cual se deben tratar de mejorar estos valores.
- El análisis de proteínas (11,32%) del residuo de extracción de los residuos cárnicos indicó un alto y valioso contenido, el cual debe ser considerado y aprovechado en otro tipo de industria para ser implementado en la alimentación animal. Esto que demuestra que el empleo del biodiesel bovino trae muchas ventajas económicas.
- El método de obtención del biodiesel por medio de la transesterificación alcalina a las

condiciones dadas mostró ser un procedimiento satisfactorio, ya que se obtuvo con pocos problemas y resultados favorables.

- Los parámetros físicos y químicos del biodiesel bovino obtenidos cumplieron la mayoría de las normas internacionales: el índice de yodo ( $50,60 \text{ g I}_2/100 \text{ g}$ ) fue inferior al valor máximo recomendado en la norma, el punto de inflamación ( $173,67^\circ\text{C}$ ) es aceptable al ser superior al valor mínimo descrito en la norma, el poder calorífico ( $36947,4 \text{ KJ/Kg}$ ) es aceptable al estar alrededor al valor descrito en la norma, la viscosidad cinemática ( $6,12 \text{ mm}^2/\text{s}$ ) no cumple al ser ligeramente mayor al límite superior de la norma, la corrosión de la lámina de cobre (1b) es válida, la apariencia (limpio y brillante) es aceptable y se confirmó la disminución del color con el producto biosil G (paso de L4 ASTM color a L3 ASTM color).
- La humedad del biodiesel ( $0,24\%$ ) no es la recomendada por lo cual debe considerarse un sistema de secado más efectivo.
- La desventaja más grande en la implementación de biodiesel bovino esta dada por la densidad ( $0,8652 \text{ g/cm}^3$  a  $23^\circ\text{C}$ ), ya que este aceite esterificado se solidifica a  $15^\circ\text{C}$ , por lo cual debe contemplarse un análisis que evalúe su empleo a condiciones específicas como por ejemplo la implementación de mezclas con diesel u otro tipo de biodiesel o la opción de uso en climas cálidos.
- Con la cromatografía de gases acoplada a un espectrómetro de masa (CE-EM) se verificó que el sebo bovino fue satisfactoriamente esterificado.
- El análisis realizado por CE-EM indicó que los componentes mayoritarios en el biodiesel bovino son el palmitato de metilo, estearato de metilo, el oleato de metilo y el miristato de metilo.
- En las pruebas mecánicas, los resultados de torque para el biodiesel no difirieron mucho con respecto a los resultados encontrados por el diesel fósil, pero ambos si se

encuentran por debajo de los valores dictados por el fabricante.

- En las pruebas en el motor se observó una pérdida en la potencia en el biodiesel con respecto al diesel puro, esto se debe a que el biodiesel tiene un poder calorífico menor y una mayor viscosidad.
- El consumo de específico en la mezcla biodiesel-diesel es superior comparado con los resultados del diesel puro, esto ocurre porque el poder calorífico del biodiesel es menor que el del diesel.
- Al trabajar con mezclas de biodiesel – diesel el porcentaje de opacidad disminuyó, por lo cual las mezclas con biodiesel son menos contaminantes que el diesel fósil puro.
- El bajo desempeño del biodiesel en las pruebas realizadas en el Laboratorio de Maquinas de Combustión Interna puede estar relacionado a la poca estabilidad oxidativa del biodiesel, ya que las pruebas mecánicas se realizaron 5 meses después de la producción del biodiesel, por esta razón debe considerarse un estudio de estabilidad del biodiesel y de las condiciones óptimas de almacenamiento.

## 9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda trabajar con residuos cárnicos frescos tanto para su extracción como para su posterior transformación, ya que el índice de peróxidos aumenta fácilmente con el tiempo.
- Es importante realizar la molienda de los residuos cárnicos antes de ser almacenados bajo refrigeración, ya que de esta forma se facilita su posterior manipulación.
- Se debe trabajar con reactivos anhidros en la reacción de transesterificación para evitar la formación de jabones, de igual manera pasa con la grasa extraída por lo cual se debe tener en cuenta un calentamiento o secado para la grasa antes de realizar la reacción.
- Durante la obtención del biodiesel en el lavado se recomienda una agitación suave para evitar la formación de jabones.
- Se debe considerar una forma más efectiva de secado del biodiesel con el fin de encontrar un valor que se aproxime a las normas (0,05%).
- Se deben buscar métodos para disminuir la cantidad de calcio, fósforo y cloruros, con el fin de llevarlos a valores aceptables.
- Es recomendable realizar estudios de estabilidad oxidativa del biodiesel bovino, para establecer el tiempo recomendable para su empleo y también considerar un análisis de las mejores condiciones de almacenamiento.
- Podría llevarse a cabo un estudio de cromatografía de gases en modo de barrido total del espectro (SCAN) para identificar los compuestos que no fueron reconocidos en la corrida realizada (SIM).
- Sería interesante un estudio que investigue las mejores proporciones en mezcla diesel-



biodiesel que den un buen rendimiento en el motor.

## 9. BIBLIOGRAFIA

1. GARCÍA, Belkys y GARCÍA, Lenin de Jesús. Economía para administradores: “Teoría de la demanda, el petróleo a nivel mundial y la República Dominicana”. [En línea]. República Dominicana. Universidad Tecnológica de Santiago, dic. 2007. Disponible en: <http://www.gestiopolis.com/economia/teoria-de-la-demanda-petroleo-mundial.htm>
2. LOPEZ, Arturo y URRUTIA, Diego. “Tendencias mundiales en el uso de la electricidad en el transporte (tecnologías, costos, perspectivas). Opciones para la región metropolitana”. [En línea]. Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile., oct. 2009. Disponible en: <http://web.ing.puc.cl/~power/mercados/transporteelec/linked/ien%203320%20informe%20final%20alo%20dur.pdf>
3. JÉRÔME, Hervé. Diseño conceptual de una planta de biodiesel. [En línea]. Chile, ago. 2007, 157 p. Trabajo de grado (Ingeniero civil). Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Departamento de ingeniería mecánica. Disponible en: [http://www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2007/herve\\_j/sources/herve\\_j.pdf](http://www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2007/herve_j/sources/herve_j.pdf)
4. ESPINOSA, Michele et al. Beef tallow biodiesel produced in a pilot scale. En: Fuel Processing Technology 90 (2009) 570–575.
5. VILLEGAS, Alberto. Cuadro de ubicación y cantidades de materia prima para obtención de biodiesel. Grasas animales, aceite de frituras. Kilos por mes departamento de Risaralda. [En línea]. Ingenieros en Proyectos Agroindustriales Limitada. Pereira (Colombia). 2009.
6. FINLEY, Robert; HOLTZ, Mark y NANCE, Peter. Reduction of greenhouse gas emissions through underground co2 sequestration in texas oil and gas reservoirs. [En línea]. Bureau of Economic Geology. The University of Texas at Austin. University Station. Texas, ago. 1999. Disponible en: <http://129.116.232.161/gccc/bookshelf/Final%20Papers/99-01-Final.pdf>

7. OCHOA, Raúl y ORTEGA, Cesar. Biodiesel: Combustible del futuro. Claridades agropecuarias. México, D.F.: Ediciones ASERCA, 2007. 12 p.
8. CORTÉS, Elkin; PARDO, Sandra y SUAREZ, Héctor. Biocombustibles y autosuficiencia energética. [En línea]. En: Revista de la facultad de minas. vol.72 no.158. Universidad Nacional de Colombia. (may-ago, 2009). Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532009000200010&script=sci\\_arttext&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532009000200010&script=sci_arttext&tlng=es)
9. RAMÍREZ, Lílido. Factores que afectan el período vacío en vacas carora y mestizas. [En línea]. En: Mundo pecuario. IV, N° 3, 130-144 (2008). Disponible en: <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/29465/1/articulo1.pdf>
10. AGUDELO, John; BENJUMEA, Pedro y CANO, Gabriel. Estudio experimental de las variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma para la producción de biodiesel. En: Scientia et Technica, año X, No 24 (mayo 2004). UTP.
11. GÜRÜ, Metin; DOGAN, Bursev; KESKIN, Ali y KOCA Atilla. Biodiesel production from waste animal fat and improvement of its characteristics by synthesized nickel and magnesium additive. En: Energy Conversion and Management 50 (2009) 498–502.
12. MIRANDA, Yerling y SOTOMAYOR, Octavio. Elaboración de biodiesel a partir de aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*): Estandarización de una metodología. Guácimo (Costa Rica), dic. 2002. [En línea]. Trabajo de grado (Ingeniero agrónomo). Universidad Earth. Disponible en: <http://usi.earth.ac.cr/glas/sp/dpg/99066.pdf>
13. DALLA, Bruno; QUERINI, Carlos y PISARELLO, María. Procesos de Producción de Biodiesel: Uso de Materias Primas Alternativas y de Alta Acidez. [En línea]. Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica. Universidad Nacional del Litoral Facultad de Ingeniería Química. Santa Fe (Argentina). Disponible en: [http://e-petroquimica.com.ar/trabajos/procesos\\_de\\_produccion.pdf](http://e-petroquimica.com.ar/trabajos/procesos_de_produccion.pdf)

14. SALERNO, Humberto. Economía. La demanda mundial de petróleo aumenta en 880.000 barriles diarios gracias a China, Oriente Medio y Asia. [En línea]. Disponible en: <http://www.noticias.com/noticia/demanda-mundial-petroleo-aumenta-880000-barriles-diarios-gracias-china-oriente-medio-y-asia-7kl.html>
15. ESCORIHUELA, José. El hombre: una amenaza para la tierra. El petróleo se acaba [En línea]. En: Revista Esfinge, No 31. España, 2003. Disponible en: <http://www.editorial-na.com:80/articulos/articulo.asp?art=141>
16. CALA, David. Proyecto para producción de biodiesel a partir de palma africana en Colombia. Corporación para el desarrollo industrial de la biotecnología y producción limpia. Colombia, 2003.
17. MARTINEZ, Héctor. La cadena de las oleaginosas en Colombia: una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005. [En línea]. Documento de trabajo No. 62. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Observatorio Agrocadenas Colombia. Bogotá (Colombia), mar. 2005. Disponible en: [http://www.agronet.gov.co/www/docs\\_agronet/2005112162648\\_caracterizacion\\_oleaginosas.pdf](http://www.agronet.gov.co/www/docs_agronet/2005112162648_caracterizacion_oleaginosas.pdf)
18. CENIPALMA. Investigación e innovación tecnológica en palma de aceite: Colombia, primer país mundial y latinoamericano en alcanzar una mezcla de 5% de biodiesel en todo su territorio. [En línea]. Colombia, 2009. Disponible en: <http://www.cenipalma.org/es/node/219>
19. MARTÍNEZ, Hernán. Modificación de la Resolución 18 2142 de 2007: en relación con el programa de mezcla de biocombustibles para uso en motores diesel. [En línea]. Ministerio de minas y energía. Colombia, 2009. Disponible en:

[http://www.fendipetroleo.com/web\\_fendipetroleo/pdf/resolucion\\_181318\\_05-08-2009.pdf](http://www.fendipetroleo.com/web_fendipetroleo/pdf/resolucion_181318_05-08-2009.pdf)

20. CORTÉS, Elkin; PARDO, Sandra y SUAREZ, Héctor. Biocombustibles y autosuficiencia energética. Departamento Ingeniería Agrícola y Alimentos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín (Colombia), oct. 2008.
21. AMADO, Eliseo; GAFARO, Alexis y VILLAMIZAR, Alvaro. Evaluación del proceso de producción de biodiesel a partir de grasas amarillas con altos contenidos de ácidos grasos libres. En: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, año/vol. 3, número 001. Universidad de Pamplona. Bucaramanga (Colombia), 2005.
22. CASTRO, Paula; COELLO, Javier; CASTILLO Liliana. Opciones para la producción uso de biodiesel en el Perú. 1ª Edición. Lima (Perú): Ediciones Soluciones practicas, 2007. 173 p.
23. DOMINGUEZ, Juan y ESPINEL, Ramón. Análisis de factibilidad para la introducción del biodiesel en ecuador. En: Quinta Época. Año XIII. Volumen 25. Jul-dic 2009.
24. PERÉZ, Carlos. Estudio de Mercado del Biodiésel en El Salvador, Honduras y Nicaragua. 1ª Edición. Honduras: Comunica, oct. 2008. 98 p.
25. RIVERA, Ivanna; SANDOVAL, Georgina y VILLANUEVA, Gerardo. Producción de biodiesel a partir de residuos grasos animales por vía enzimática. En: Grasas y aceites, 60 (5), oct.-dic., 468-474, 2009. Issn: 0017-3495.
26. BRAMMER, Scott; MUNIYAPPA, Praveen y NOUREDDINI, Hossein. Improved conversion of plant oils and animal fats into biodiesel and co-product. En: Bioresource Technology 56 (1996) 19-24.
27. JANULIS, Prutenis; KAZANCEV, Kiril; MAKAREVIČIENĖ, Violeta y SENDŽIKIENĖ, Eglė. Usage of Fatty Waste for Production of Biodiesel. En:

Environmental research, engineering and management. No. 4(34), P.101-105. 2005.

28. TEIXEIRA, Leonardo et al. Characterization of beef tallow biodiesel and their mixtures with soybean biodiesel and mineral diesel fuel. En: Biomass and bioenergy, 34 (2010) 438 – 441.
29. ALTUN, Sehmus y ÖNER, Cengiz. Biodiesel production from inedible animal tallow and an experimental investigation of its use as alternative fuel in a direct injection diesel engine. En: Applied Energy, 86 (2009) 2114–2120.
30. GÜRÜ Metin et al. Biodiesel production from waste chicken fat based sources and evaluation with Mg based additive in a diesel engine. En: Renewable Energy 35 (2010) 637–643.
31. HERRERA, Juan Alberto; VELEZ, Julián Andrés. Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un combustible (biodiesel). Pereira, 2007, 80 p. Trabajo de grado (Tecnología Química). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología. Escuela de química.
32. CORTES, J. Producción de biodiesel a partir de subproductos de la industria avícola. Megaproyecto para el futuro. 1er Seminario Internacional de Biocombustibles. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá (Colombia), 2004.
33. AL-SALIM, Hikmat y IBREHEM, Ahmmed. Advanced Mathematical Model To Describe The Production Of Biodiesel Process. [En línea]. En: Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis, 4(2), 37-42 (oct. 2009). Disponible en: <http://www.undip.ac.id/bcrec/vol4/bcrecv4n2p37-42y2009.pdf>
34. BOZBAS, Kahraman. Biodiesel as an alternative motor fuel: production and policies in the european unión. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12 (2008) 542–552

35. MEHER, L.C; NAIK S.N. y VIDYA, D. Technical aspects of biodiesel roduction by transesterification—a review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 10 (2006) 248–268.
36. JÁUREGUI, Juan. Producción de biodiesel a partir de grasas de desecho. Universidad Autónoma de Aguascalientes. Departamento de ingeniería bioquímica. Centro de cicias básicas. Aguascalientes (México), 2006.
37. DEMIRBAS, Ayhan. Importance of biodiesel as transportation fuel. En: Energy Policy 35 (2007) 4661–4670
38. FREDRICKSON, Donald y GORDON, Robert. Transport of fatty acid. En: Physiological reviews. Vol. 38, No 4, oct. 1958.
39. BRAVO, Elizabeth. A quién beneficia el negocio de los biocombustibles. [En línea]. Abr. 2007. Disponible en: <http://www.grain.org/biodiversidad/index.cfm?id=351%20>
40. FALASCA, Silvia y ULBERICH, Ana. Las especies del género Jatropha para producir biodiesel en Argentina. [En línea]. En: Revista virtual REDESMA. 2008. Disponible en: [http://www.agroenergeticos.com.ar/investigaciones/inv\\_1-jatrophas.pdf](http://www.agroenergeticos.com.ar/investigaciones/inv_1-jatrophas.pdf)
41. POUSA, Gabriella; SANTOS, André y SUAREZ, Paulo. History and policy of biodiesel in Brazil. En: [Energy Policy](#), [Vol. 35, Issue 11](#), Nov. 2007.
42. LORENZO, Cristian. La fiebre del biodiesel en Argentina. [En línea]. Argentina, 2007. Disponible en: <http://www.biodiesel.com.ar/download/LaFiebre delBiodiesel.pdf>
43. Norma Colombiana. ICONTEC. El biodiésel colombiano ya tiene norma de calidad. Notas de normalización. Notas para el consumidor [En línea]. 2007. Disponible en: <http://ssio.icontec.org.co:81/Bol-11-07-Normas-consumidor.aspx>
44. FEDEPALMA. Anuario estadístico 2008: Estadísticas del cultivo de la Palma de Aceite en Colombia y el mundo. Bogotá (Colombia), 2008.

45. VERA, Julio. El programa de biocombustibles en Colombia. [En línea]. Ministerio de minas y energía. Colombia, sept. 2007. Disponible en: <http://www.olade.org/biocombustibles2008/Documents/ponencias/día1/Sesion1/JulioVera.pdf>
46. GANDUGLIA, Federico. Diagnostico y estrategias para la mejora de la competitividad de la agricultura argentina: Diagnostico y estrategias para el desarrollo de los biocombustibles en La Argentina. 1ª edición. Buenos Aires (Argentina): Consejo Argentino para las Relaciones Internacionales – CARI, 2008. 595 p.
47. FEDERACIÓN NACIONAL DE CULTIVADORES DE PALMA DE ACEITE. El programa de biodiesel en Colombia, un verdadero programa con visión del futuro [En línea]. Bogotá, 2007. Disponible en: [http://www.fedepalma.org/documentos/2007/-Biodiesel\\_MinMinas.pdf](http://www.fedepalma.org/documentos/2007/-Biodiesel_MinMinas.pdf)
48. ASOCIACIÓN DE ARMADORES PESQUEROS DEL CARIBE. El aumento en los precios del diesel marino y sus efectos en la industria pesquera. Colombia, 2005. Disponible en: <http://www.cco.gov.co/anterior/congreso%202005/Foro%20Pesca/5%20combustibles.pdf>
49. KOLODZIEJ, Carlos; POSLUSZNY, Lucio y POSLUSZNY, José. El biodiesel un combustible alternativo. Universidad Nacional de Misiones. Argentina, 2007.
50. MATEOS, G., MEDEL, P. y REBOLLAR. Utilización de grasas y productos lipídicos en alimentación animal: grasas puras y mezclas. [En línea]. FEDNA. Madrid (España), nov. 1996. Disponible en: <http://www.etsia.upm.es/fedna/capitulos/96capituloI.pdf>
51. GERPEN, Jon. Biodiesel processing and production. En: Fuel Processing Technology 86 (2005) 1097– 1107.



52. MONTESANO, Juan; HUTIN, Adela y DIPIETRO, Angel. La producción de biocombustibles con eficiencia, estabilidad y equidad: Estudio de procesos innovadores para la producción de biodiesel. [En línea]. Centro de las energías. Centro de estudios internacionales para el desarrollo. Argentina, oct. 2007. Disponible en: [http://www.ceid.edu.ar/biblioteca/biocombustibles/ponencia\\_montesano\\_hutin\\_dipietro\\_turchetti\\_estudio\\_de\\_procesos\\_innovadores\\_para\\_la\\_produccion\\_de\\_biodiesel.pdf](http://www.ceid.edu.ar/biblioteca/biocombustibles/ponencia_montesano_hutin_dipietro_turchetti_estudio_de_procesos_innovadores_para_la_produccion_de_biodiesel.pdf)
53. BENAVIDES, Alirio; BENJUMEA, Pedro y PASHOVA, Veselina. El biodiesel de aceite de higuera como combustible alternativo para motores diesel. [En línea]. En: Revista facultad nacional de minas. vol.74 no.153. Medellín (Colombia), sep.-dic. 2007. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532007000300016&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532007000300016&script=sci_arttext)
54. SALAGER, Jean y FERNANDEZ, Alvaro. Modulo de enseñanza en fenómenos interfaciales: Surfactantes. [En línea]. Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. Escuela de ingeniería química. Mérida (Venezuela), 2004. Disponible en: <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S302.pdf>
55. KNOTHE, Gerhard. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. En: Fuel Processing Technology 86 (2005) 1059– 1070.
56. TOROSSI, Favio. Reacciones en contexto: La transesterificación en la producción de biodiesel a partir de aceite de fritura usado. En: Revista ANALES de la Real Sociedad Española de Química, 102(3), 43 – 49, sept. 2006.
57. BARRIETOS, Heberth. Estudio comparativo para determinar ventajas del aceite sintético, sobre el mineral en el motor diesel cummins N-14 del cabezal freightliner # 134 de la empresa serca. [En línea]. Guatemala, mar. 2006, 99 p. Trabajo de grado (Ingeniero mecánico). Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Disponible en: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_7349.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_7349.pdf)

- 58.** ORTMANN, Rainer. Consumo específico de combustible. Técnica de gases de escape para motores de gasolina. Segunda edición. Alemania: Robert Bosch GbmH, 2003. 96 p.
- 59.** AGUDELO, Andrés; AGUDELO, John y BEDOLLA, Iván. Emisiones gaseosas y opacidad del humo de un motor operando con bajas concentraciones de biodiesel de palma. [En línea]. En: Ingeniería y Desarrollo, No 18, jul.-dic. 2005. ISSN: 0122-3461. Disponible en: [http://ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/ingenieria\\_desarrollo/18/1\\_Emisiones%20gaseosas%20.pdf](http://ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/ingenieria_desarrollo/18/1_Emisiones%20gaseosas%20.pdf)
- 60.** SWANSON, Kimberly; MADDEN, Michael y GHIO, Andrew. Biodiesel Exhaust: The Need for Health Effects Research. [En línea]. En: Environ Health Perspect, 115(4): 496–499. Abr. 2007. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1852688/>
- 61.** SAUCEDO, Edison. Calidad del biodiesel y desempeño de los motores. [En línea]. División Medio Ambiente, Seguridad Industrial y Gestión de Calidad, ANCAP. Uruguay, 2006. Disponible en: <http://www.unit.org.uy/novedades/novedad.php?idC=392>
- 62.** AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. The national biodiesel board. Especificaciones para biodiesel (B100). United States, 2007. (ASTM D6751).
- 63.** MATISSEK, Reinhard; SCHNEPEL, Frank M. y STEINER Gabrielle. Análisis de los alimentos: Fundamentos – Métodos - Aplicaciones. España: Editorial Acribia S.A., 1992.
- 64.** BERNAL, Inés. Análisis de alimentos. Primera edición. Santafé de Bogotá D.C: Editora Guadalupe LTDA., 1993. 313 p.

65. BERNIER, Ivonne. Resolución 37257 del 30 de diciembre de 2003 [En línea]. Ivonne Bernier laboratorio LTDA. Bogotá, Colombia, 2003. Disponible en: [http://www.sic.gov.co/Informacion\\_Interes/Entidades%20acreditadas/Labs%20Ensayo/3-48.pdf](http://www.sic.gov.co/Informacion_Interes/Entidades%20acreditadas/Labs%20Ensayo/3-48.pdf)
66. MIRANDA, Antonio. Determinación de lípidos (extracto etéreo). [En línea]. Universidad Michoacana de San Nicolas Hidalgo. Facultad de Químico-Farmacobiología. México, 2008. Disponible en: <http://practica2extractoprimeraclinicos.blogspot.com/2008/12/reporte-de-practicas-de-extracto-etereo.html>
67. CUELLAR, Andrés. Resolución 51434 del 2 de octubre de 2009 [En línea]. Universidad Nacional de Colombia. Laboratorio de análisis químico y bromatológico. Medellín (Colombia), 2009. Disponible en: [http://www.sic.gov.co/-Informacion\\_Interes/Entidades%20acreditadas/Labs%20Ensayo/3-145.pdf](http://www.sic.gov.co/-Informacion_Interes/Entidades%20acreditadas/Labs%20Ensayo/3-145.pdf)
68. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grasas y aceites. Método de determinación del índice de acidez. Santa Fe de Bogotá (Colombia), 1999. (NTC 218)
69. Ministerio de Planificación del Desarrollo, Viceministerio de Planificación Territorial y Ambiental Programa Nacional de Cambios Climáticos (PNCC). Proyecto: “Adecuación Tecnológica de la Obtención de Biodiesel”. Universidad Mayor de San Andrés, Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (IIDEPROQ). La Paz (Bolivia), 2007. 145 p.
70. TOBÓN, Flor; ROMÁN, María; MOLINA, Sadoh y BOTHER, Janet. Determinación del perfil de ácidos grasos de la secreción de la glándula uropigial de la Coturnix coturnix japonica (codorniz doméstica). [En línea]. En: Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias, Vol. 15, No 2 (2002). Disponible en: <http://rccp.udea.edu.co/index.php/ojs/article/view/84>

71. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grasas y aceites. Método de determinación del índice de saponificación. Santa Fe de Bogotá (Colombia), 1970. (NTC 335)
72. DÍAZ, Oscar y GIOIELLI, Luiz. Consistencia de lípidos estructurados a partir de aceite de pescado y grasa de palmiste. En: Grasas y Aceites, Vol 54, No 2 (2003).
73. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grasas y aceites. Método de determinación del índice de yodo. Santa Fe de Bogotá (Colombia), 1969. (NTC 283)
74. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grasas y aceites. Método de determinación del índice de peróxido. Santa Fe de Bogotá (Colombia), 1969. (NTC 236)
75. HANNA INSTRUMENTS. Medidor de Peróxidos en Aceite. Fotómetro HI 83730 [En línea]. Laboratorio de Estudios Técnicos del Instituto Superior de Agronomía. Laboratorio de Aceites, Tapada da Ajuda-1349-017, Portugal. Disponible en: [http://www.infoagro.com/instrumentos\\_medida/medidor.asp?id=6018&Medidor%20de%20Peroxidos%20en%20Aceite.%20Fotómetro%20HI%2083730](http://www.infoagro.com/instrumentos_medida/medidor.asp?id=6018&Medidor%20de%20Peroxidos%20en%20Aceite.%20Fotómetro%20HI%2083730)
76. MALVERDE, Patricio. Cinética de producción de biodiesel en un reactor con agitación por inyección. [En línea]. Chillán (Chile), 2009. 36 p. Trabajo de grado (Ingeniero civil agrícola). Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería Agrícola. Disponible en: [http://www.bibliodigital.udec.cl/sdx/UDEC3/tesis/2009/malverde\\_p/doc/malverde\\_p.pdf](http://www.bibliodigital.udec.cl/sdx/UDEC3/tesis/2009/malverde_p/doc/malverde_p.pdf)
77. MOURE PELÁEZ, Alba. PÉREZ MARTOS, Francisco. Espectroscopia de absorción atómica. [En línea]. España, 2004. Disponible en:

[http://www.xtec.es/~gjimene2/llicencia/students/bscw.gmd.de\\_bscw\\_bscw.cgi\\_d32817116-3\\_AAS\\_final.html](http://www.xtec.es/~gjimene2/llicencia/students/bscw.gmd.de_bscw_bscw.cgi_d32817116-3_AAS_final.html)

- 78.** DAZA, Christie Johanna. Proyecto de Norma Técnica Colombiana. Biodiesel para uso en motores diesel. Especificaciones. Colombia, 2004.
- 79.** ROCHA, Fábio y TEIXEIRA, Leonardo. Estratégias para aumento de sensibilidade em espectrofotometria UV-VIS. [En línea]. En: Química Nova, vol.27, n.5, pp. 807-812. 2004. ISSN 0100-4042. Disponible en: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422004000500021&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422004000500021&script=sci_abstract&tlng=pt)
- 80.** AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Determination of Additive Elements in Lubricating Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry. United States. (ASTM D4951)
- 81.** VINASCO, J.; JARAMILLO, D. y BTANCOURT, R. Análisis de cloruros. Universidad del Valle. Departamento Tecnología Química. Santiago de Cali (Colombia), 2007.
- 82.** BROWN, Glenn. SALLE, Eugene. Química cuantitativa. España: Editorial Reverté S.A. 1997.
- 83.** SANZ, J.; CABREDO, S.; DE MARCOS, S. y GALBÁN, J. Determinación de sulfuros en aguas mineromedicinales de la Rioja. En: Zubia, 10, 161-168. 1992.
- 84.** SIERRA, Germán; ECHAVARRÍA, Adriana y PALACIOS, Luz Amparo. Síntesis de la Libetenita por métodos hidrotérmicos. [En línea]. En: Revista Facultad de ingeniería. Universidad de Antioquia, no.48. Medellín (Colombia), Abr./Jun. 2009. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012062302009000200001&script=sci\\_artext&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012062302009000200001&script=sci_artext&tlng=es)

- 85.** AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. Test Method for Density and Relative Density of Liquids by Digital Density Meter. United States, 1996 (ASTM D4052-96)
- 86.** SKOOG, Douglas A.; HOLLER, F. James; NIEMAN, Timothy A. Principios de análisis instrumental. Quinta edición. Madrid España: Mc Graw Hill/ Interamericana de España, S.A.U., 2003. 1028 p.
- 87.** MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL Y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 1289 del 7 de septiembre de 2005 [en línea]. Colombia, 2005. Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/juridica\\_normatividad/normatividad/viceministerio\\_ambiente/ambiental/combustibles/res\\_1289\\_070905.pdf](http://www.minambiente.gov.co/juridica_normatividad/normatividad/viceministerio_ambiente/ambiental/combustibles/res_1289_070905.pdf)
- 88.** UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. Practicas Fisicoquímica. Fenómenos de transporte y electroquímica. Experimento 16: Determinación de la viscosidad de los líquidos. Pereira, Colombia.
- 89.** AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (the Calculation of Dynamic Viscosity). United States, 2001. (ASTM D445)
- 90.** LOERA-QUEZADA, Maribel y OLGUÍN, Eugenia. Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: retos y oportunidades. [En línea]. En: Revista Latinoamericana de Biotecnología Amb Algal 1 (1): 91-1169, 2010. Disponible en: [http://www3.inecol.edu.mx/relbaa/images/docs/relbaa\\_-\\_v1n1.pdf#page=91](http://www3.inecol.edu.mx/relbaa/images/docs/relbaa_-_v1n1.pdf#page=91)
- 91.** ACOSTA, Orlando y CHAPARRO, Alejandro. Biocombustibles, Seguridad Alimentaria y Cultivos Transgénicos. [En línea]. Universidad Nacional de Colombia.

En: RSAP, Vol 11, No 2 (2009). ISSN: 0124-0064. Disponible en:  
<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/revsaludpublica/article/viewArticle/10301/10958>

- 92.** MONTORO, Lino. MARTINEZ, Tormos y VICENTE, Bernardo. Contribución al desarrollo y mejora de técnicas para la detección y análisis de partículas metálicas y contaminantes en aceites lubricantes usados. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Maquinas y Motores Térmicos. España, 2005.
- 93.** AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester. United States, 2005. (ASTM D92)
- 94.** SMITH, J.; VAN NESS, H. y ABBOTT, M. Introducción a la termodinámica en ingeniería química. 4ª edición. México: MCGRAW-HILL/ Interamericana editores, S.A. de C.V., 1997.
- 95.** UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. Practicas Fisicoquímica. Termoquímica. Práctica 2: Calor de combustión. Pereira, Colombia.
- 96.** UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA. Laboratorio de fisicoquímica. Calorimetría [En línea]. Departamento de Ciencias. Colombia. Disponible en:  
<http://200.13.98.241/~javier/practica5.pdf>
- 97.** AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter. United States. (ASTM D240)
- 98.** SHAINÉ, K. Biodiesel Handling and Use Guidelines. [En línea]. National Renewable Energy Laboratory. A national laboratory of the U.S. Department of Energy. EEUU, sept. 2001. Disponible en:

[http://www.angelfire.com/ks3/go\\_diesel/files042803/biodiesel\\_handling.pdf](http://www.angelfire.com/ks3/go_diesel/files042803/biodiesel_handling.pdf)

99. AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Free Water and Particulate Contamination in Distillate Fuels (Visual Inspection Procedures). United States, 2002. (ASTM D4176)
100. AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. Standard Test Method for ASTM Color of Petroleum Products (ASTM Color Scale). United States, 2002. (ASTM D1500)
101. OHARRIZ, Ainhoa. La biosfera V: Las grasas como materia prima. Química Industrial [En línea]. Disponible en: [www.sc.ehu.es/iawfemaf/archivos/materia/industrial/libro-14.PDF](http://www.sc.ehu.es/iawfemaf/archivos/materia/industrial/libro-14.PDF)
102. AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test. United States, 2004. (ASTM D130)
103. WEARCHECK IBÉRICA. Determinación de la corrosión a la lámina de cobre de productos petrolíferos. Norma ASTM D130. Métodos de ensayo [En línea]. España. Disponible en: <http://www.wearcheckiberica.es/Servicios/Ensayos/Corrosion.asp>
104. GUTIÉRREZ, M.C. y DROGUET, M. La cromatografía de gases y la espectrometría de masas: identificación de los compuestos causantes de mal olor. Identificación de compuestos volátiles por CG-SM. [En línea]. En: Boletín intexter. N° 122. Universidad politécnica de Catalunya. Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/2733/1/5-CROMGASES.pdf>
105. CERÓN, Pablo Felipe y GUERRA, Lisi. Determinación del consumo específico de combustible, de las características parciales y de la opacidad de un motor diesel



- utilizando diesel y biodiesel. Pereira, 2010. Trabajo de grado (Ingeniero mecánico). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería mecánica. Programa de Ingeniería Mecánica.
- 106.** SOSO, Ariel y RIMINI, Alejandro. Validación de métodos analíticos. The Fitness for Purpose of Analytical Methods. A laboratory guide to method validation and related topics [En línea]. Disponible en: [http://www.suelos.org.ar/adjuntos/validacion\\_-\\_metodos\\_analiticos.pdf](http://www.suelos.org.ar/adjuntos/validacion_-_metodos_analiticos.pdf)
- 107.** BAUER, E.L. Manual de estadística para químicos. España: Editorial Alhambra, 1974. 188 p.
- 108.** OSPINA, Bernardo. Elementos de estadística descriptiva. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ciencias Básicas. Pereira, Colombia, 1996. 82 p.
- 109.** SÜD-CHEMIE DE MÉXICO S.A DE C.V. Información Técnica del Biosil G. Puebla (México).
- 110.** LÓPEZ, Juan Pablo. Estandarización de la técnica de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas para la identificación y cuantificación de metilésteres de ácidos grasos. Pereira (Colombia), 2008. Trabajo de grado (Tecnología química). Universidad Tecnológica. Facultad de Tecnología. Escuela de química.
- 111.** ARENAS, Lilia et al. Análisis comparativo proximal y de minerales entre carnes de iguana, pollo y res [En línea]. En: Archivos Latinoamericanos de Nutrición, vol.50 n.4 Caracas dic. 2000. ISSN 0004-0622. Disponible en: [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0004-06222000000400015&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0004-06222000000400015&script=sci_arttext)
- 112.** ESQUIVEL, Carlos. Valor nutricional de la carne. Sección alimentos [En línea]. Alimentación Sana. Argentina. Disponible en: <http://www.alimentacion-sana.com.ar/Portal%20nuevo/actualizaciones/carnes.htm>

- 113.** TORRICO Daysa et al. Aprovechamiento de residuos grasos de matadero y curtiembres. Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos. Ingeniería Química. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz (Bolivia), ago. 2004.
- 114.** FARFÁN, Norma; JUAREZ, Daniela; ROSSI, Analía y SAMMÁN, Norma. Composición química de carne de ganado bovino criollo. En: Archivos Latinoamericanos de Nutrición. Órgano oficial de la Sociedad Latinoamericana de Nutrición. Vol. 50 N° 4, 2000.
- 115.** ALI, Muhammad; ALI, Waqar; AHMED, Saeed y ULLAH, Ikram. Mineral composition, quality and physico-chemical parameters of the local tallow of Pakistan. En: Pakistan Journal of Nutrition 7 (5): 717-720, 2008. ISSN 1680-5194. Asian Network for Scientific Information, 2008.
- 116.** CIRIA, J. Ignacio. Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel [En línea]. WEARCHECK IBÉRICA. España. Disponible en: <http://www.wearcheckiberica.es/documentacion/doctecnica/combustibles.pdf>
- 117.** TEXEIRA, Leonardo et al. Comparison between conventional and ultrasonic preparation of beef tallow biodiesel. En: Fuel Processing Technology 90 (2009) 1164–1166
- 118.** Sebo fundido crudo de vacuno o grasa animal. Hoja de seguridad [En línea]. Disponible en: <http://www.procesadorademateriasprimas.com/ImgDoc/Categorias/1/1/ficha.pdf>
- 119.** SENDZIKIENE, E.; MAKAREVICIENE, V. y JANULIS, P. oxidation stability of biodiesel fuel production from fatty wastes. En: Polish Journal of Environmental Studies Vol. 14, No. 3 (2005), 335-339
- 120.** RODRIGUEZ, Francisco y GARCÍA, Hipólito. Caracterización del aceite de oliva y evolución en el tiempo el aceite envasado. Laboratorio Agroalimentario de Atarfe.

Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. España.

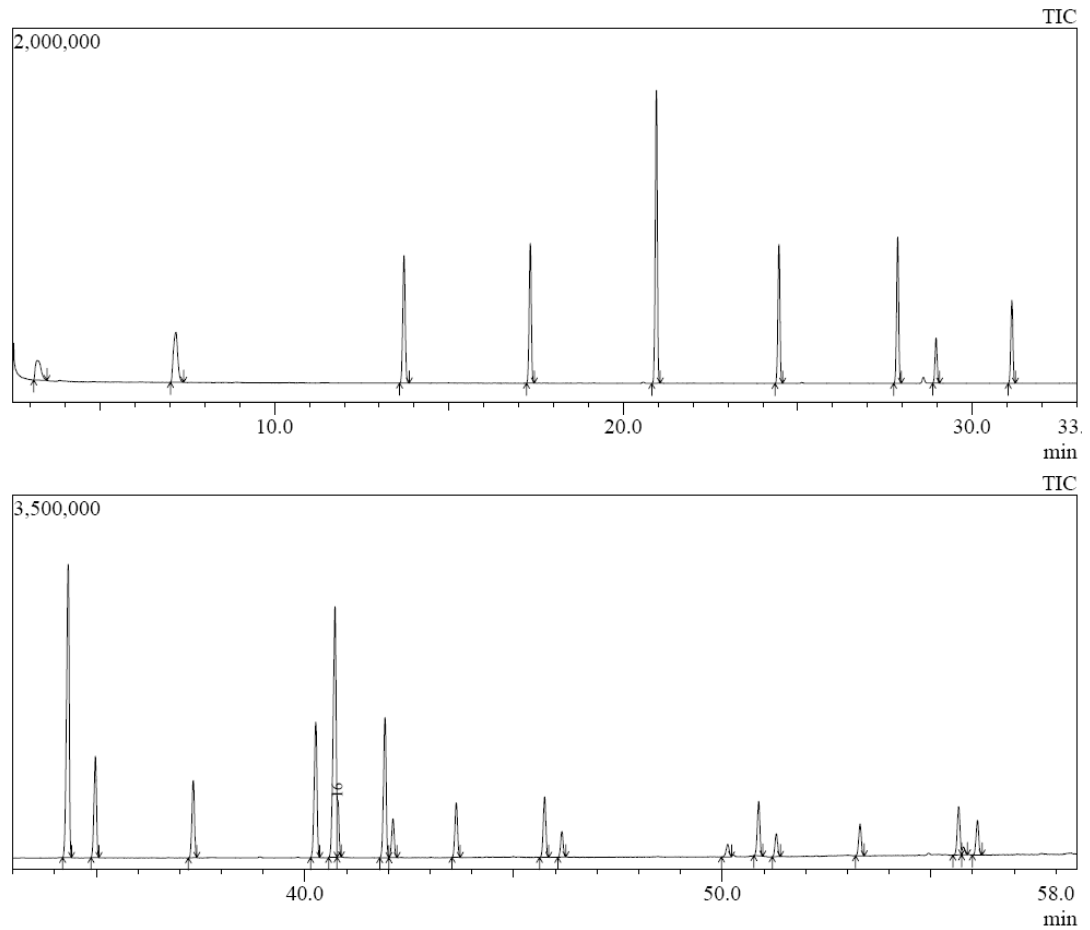
121. CLEMENTS, L.D; FANGRUI; Ma y HANNA, Milford. The effects of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow. En: American Society of Agricultural Engineers 0001-2351 / 98 / 4105-1261. Vol 41 (5): 1261 – 1264 (1998).
122. HEIN, Jan. Parámetros requeridos materia prima. Solarix Iberica. Biodiesel Professionals. España, 2008.
123. GENESCÁ, Joan. Más allá de la herrumbre III. Corrosión y medio ambiente. Primera edición. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica, S. A. de C.V., 1994. 65 p.
124. LICATA, Marcela et al. Alimentación: Aporte nutricional de las carnes [En línea]. España, 2007. Disponible en: <http://www.zonadiet.com/tablas/carne.htm>
125. SANCHÉZ, Félix. Procesado y calidad de las harinas de carne. Carnes desengrasadas y carnes ricas en grasa. Saprogal, S.A. FEDNA. Barcelona, 1993.
126. RECINOS, G.; RODRIGUEZ; A; HERNÁNDEZ, A Y YEOMANS, J. Metodología para la fabricación de biodiesel a partir del aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*) y aceite de soya usado. En: Tierra Tropical (2005) 1 (1): 51-59.
127. CLEMENTS, L.D; FANGRUI; Ma y HANNA, Milford. The effect of mixing on transesterification of beef tallow. En: Bioresource Technology 69 (1999) 289±293.
128. NAWAZI, Haq; ASIF, Muhammad; QASIM, Mohammad y REHMAN, Ata-ur. Biodiesel production from waste tallow. En: Fuel 87 (2008) 2961–2966.
129. TASHTOUSH, Ghassan; AL-WIDYAN, Mohamad y AL-JARRAH, Mohammad. Experimental study on evaluation and optimization of conversion of waste animal fat into biodiesel. En: Energy Conversion and Management 45 (2004) 2697–2711.

- 130.** CARO SANABRIA, Rinaldo; DUARTE VASALLO, Milagros. Situación mundial de la producción de biodiesel: desarrollo actual en Cuba. Programa de desarrollo energético sostenible [En línea]. Departamento de investigaciones. ICINAZ. Cuba, 2007. Disponible en: [http://www.caricom.org/jsp/projects/credp/cuba\\_study\\_tour/-seminarios-Caribe-octubre%202007.pdf](http://www.caricom.org/jsp/projects/credp/cuba_study_tour/-seminarios-Caribe-octubre%202007.pdf)
- 131.** DIAS, Joana; ALVIM-FERRAZ, Maria y ALMEIDA, Manuel. Production of biodiesel from acid waste lard. En: Bioresource Technology 100 (2009) 6355–6361.
- 132.** MESA DISHINGTON, Jens. Biocombsutibles; Potencia en Colombia. Experiencia gremial en el desarrollo del programa de biodiesel de palma en Colombia [En línea]. Colombia, 2007. Disponible en: <http://www.fedepalma.org/documen/2007/ForoCartagenaBiodiesel.pdf>
- 133.** Elaboración casera de biodiesel [En línea]. Infojardin. 2007. Disponible en: <http://foroarchive.infojardin.com/hortalizas-huerto-macetas/t-64659.html>
- 134.** BENJUMEA, Pedro; AGUDELO, John y RÍOS, Luis. Propiedades de flujo a baja temperatura del biodiesel de aceite de palma [En línea]. En: Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, no.42 Medellín oct. - dic. 2007. ISSN 0120-6230. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302007000400007&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302007000400007&script=sci_arttext)
- 135.** KNOTHE, Gerhard y STEIDLEY, Kevin. Kinematic viscosity of biodiesel components (fatty acid alkyl esters) and related compounds at low temperatures. En: Fuel 86 (2007) 2560–2567
- 136.** PEÑA, Araceli; MORALES, Johanna; LABASTIDA, Carmen y CAPELLA, Santiago. Extracción en fase sólida como una alternativa para el procedimiento de limpieza en la determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos por cromatografía de gases. En: Revista Internacional de Contaminación Ambiental, año/vol. 19, número 001. ISSN: 0188-4999

## ANEXOS

### ANEXO A

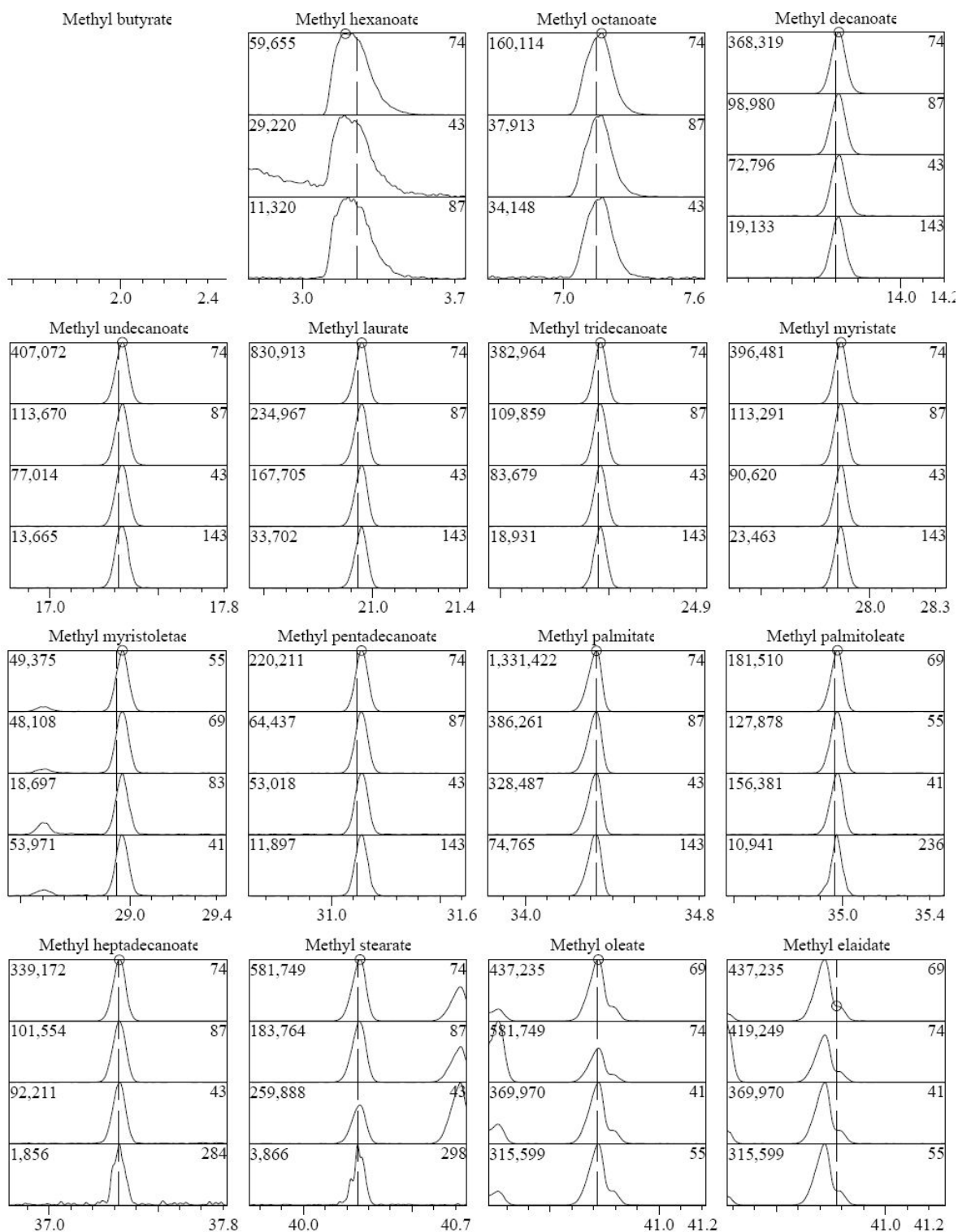
#### Cromatografía de gases estándar RESTEK 35078

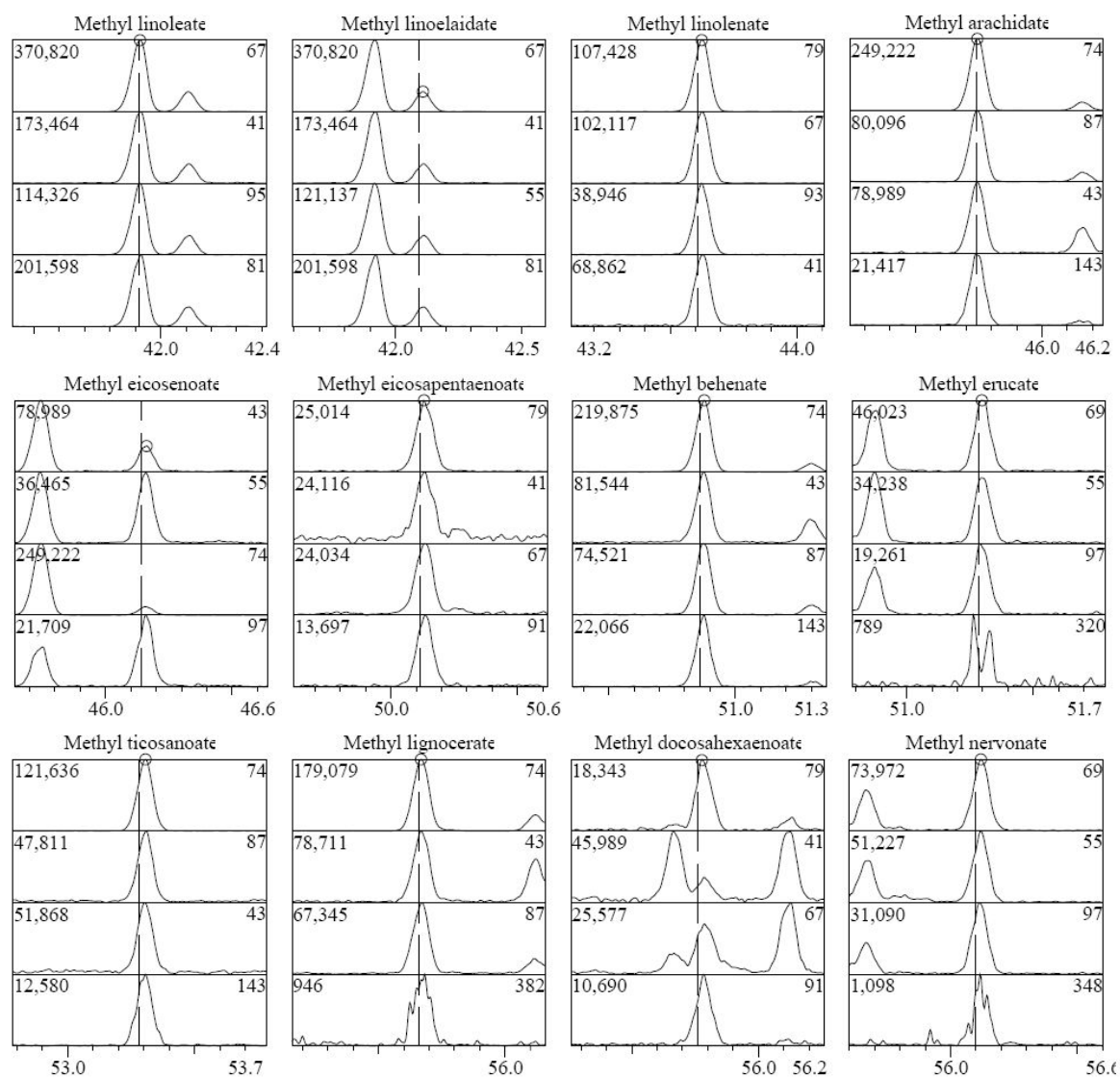


Quantitative Result Table

ID#	Name	R.Time	Area
1	Methyl butyrate	-	---
2	Hexanoic acid, methyl ester	3.199	288617
3	Octanoic acid, methyl ester	7.175	1385507
4	Decanoic acid, methyl ester	13.715	1772239
5	Undecanoic acid, methyl ester	17.334	1743596
6	Methyl laurate	20.950	3452362
7	Tridecanoic acid, methyl ester	24.463	1579525
8	Methyl myristate	27.868	1605561

ID#	Name	R.Time	Area
9	Methyl myristoleate	28.967	201918
10	Pentadecanoic acid, methyl ester	31.139	903535
11	Methyl palmitate	34.327	5920806
12	Methyl palmitoleate	34.978	764583
13	Heptadecanoic acid, methyl ester	37.323	1411882
14	Methyl stearate	40.261	2692963
15	Methyl oleate	40.722	2167324
16	Methyl elaidate	40.776	293731
17	Methyl linoleate	41.919	1644509
18	Methyl linoelaidate	42.109	452406
19	Methyl linolenate	43.625	479677
20	Methyl arachidate	45.745	1066451
21	Methyl eicosenoate	46.163	117722
22	Methyl eicosapentaenoate	50.131	120977
23	Methyl behenate	50.878	947477
24	Methyl erucate	51.297	207105
25	Methyl tricosanoate	53.307	483707
26	Methyl lignocerate	55.668	820651
27	Methyl docosahexaenoate	55.777	80567
28	Methyl nervonate	56.120	336463

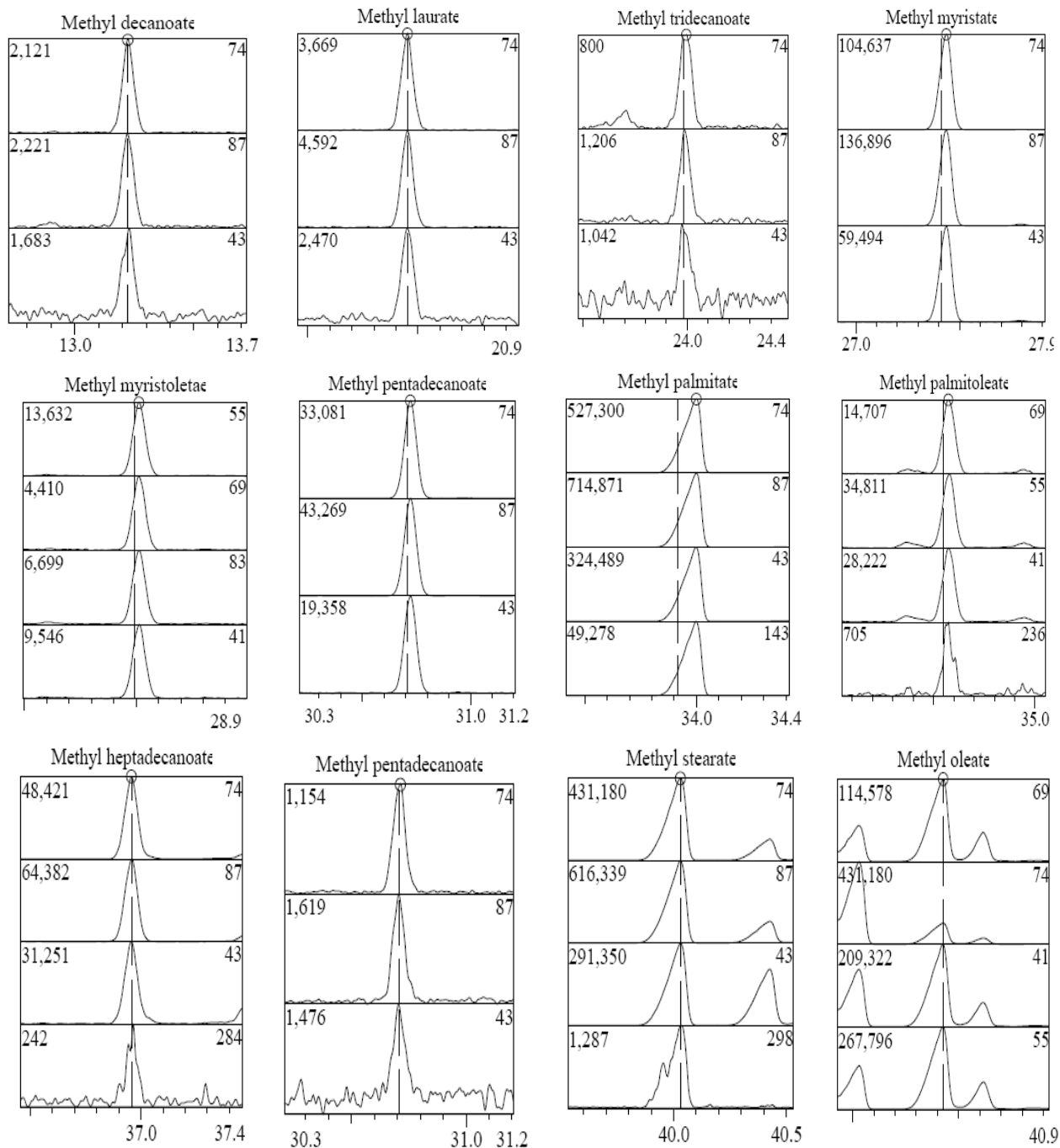


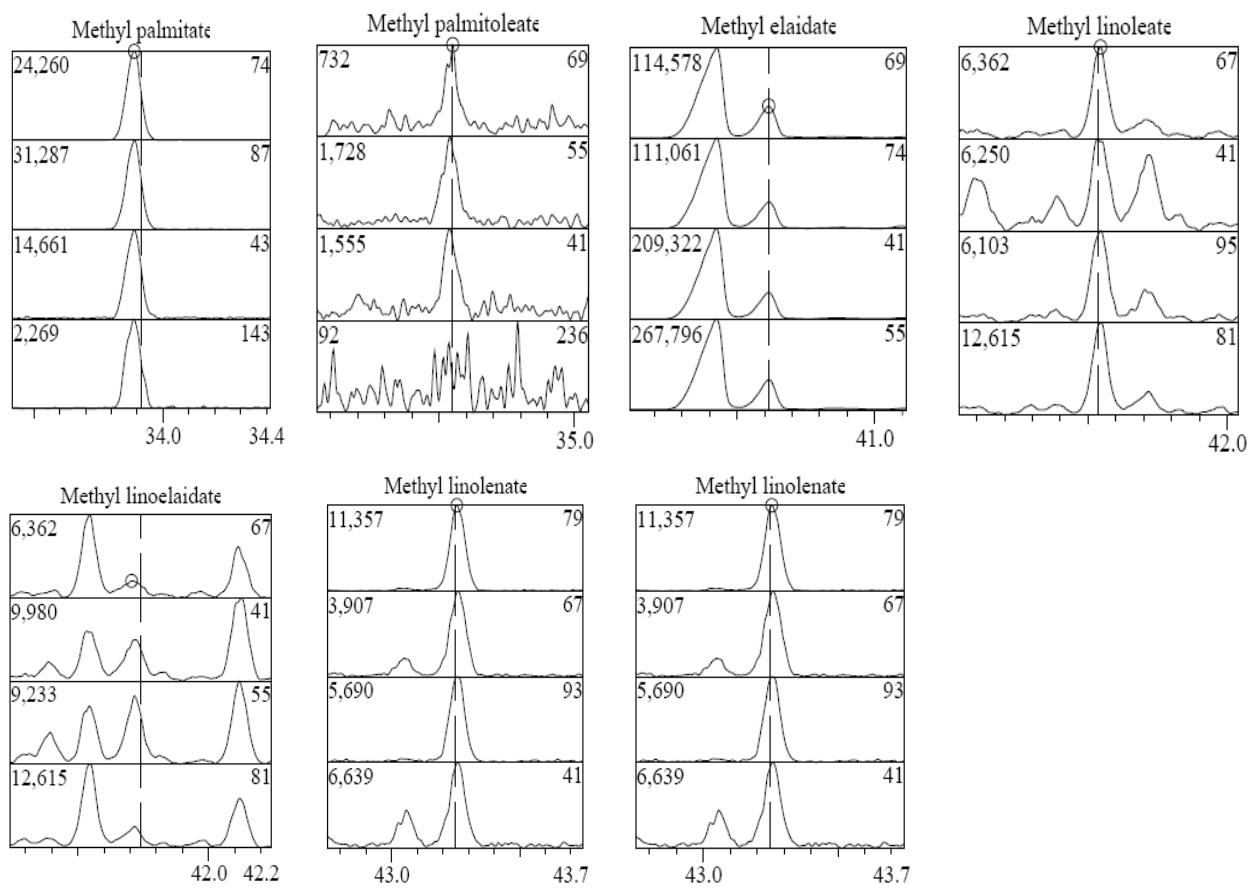




## ANEXO B

### Resultados de espectrometría de masas para el biodiesel bovino





## ANEXO C

### Expresiones para cálculos de pruebas mecánicas en motor diesel

- **Cálculo del torque**

Donde:

**T:** Torque [N-m]

**F:** Fuerza [kg]

**g:** Fuerza de gravedad [ $m/s^2$ ]

**L= 0.06417m:** brazo de aplicación de la fuerza resistiva.

- **Cálculo de la potencia**

$$P = T \cdot \omega$$

Donde:

**P:** potencia [W]

**T:** torque [N\*m]

**$\omega$  :** velocidad angular (se convierten las rpm en rad/s)

- **Cálculo del consumo específico de combustible**

Al iniciar la prueba se toma la lectura de la masa de combustible depositada en el tanque; pasado un tiempo, que depende de la duración deseada de dicha prueba, se toma la lectura final de la masa de combustible, para luego efectuar la diferencia de las lecturas la cual indica el peso del combustible consumido en el tiempo de la prueba. Este procedimiento permitió determinar cuál es el gasto del combustible del motor en kg/h.

El consumo específico de combustible está dado por la siguiente expresión matemática:

Donde:

**c.e.c:** consumo específico de combustible [g/kW\*h]

**m:** masa del combustible [g]

**P:** potencia [kW]

**t:** tiempo que se demora en consumir la masa aforada.

**Fc** factor de corrección para expresar los resultados en condiciones ambientales estandarizadas.

## **ANEXO D**

### **Procedimiento pruebas mecánicas en motor diesel**

- Etapa 1: Precalentamiento

1. Carga del combustible.
2. Encendido del motor y de todos los bancos de pruebas.
3. Tiempo de calentamiento del motor.

- Etapa 2: Prueba

4. Ajuste del porcentaje de aceleración (variación de 25, 50 y 75%).
5. Aplicación de la carga (variación de la válvula de 20 a 100%).
6. Tiempo de estabilización del motor (1 minuto).
7. Medición de la masa inicial de combustible.
8. Medición de las revoluciones por minuto cada 2 minutos.
9. Medición de la opacidad (minuto 2).
10. Fin del proceso (7 minutos).
11. Medición de la masa final de combustible.
12. Variación de la carga.
13. Última variación de la carga.

- Etapa 3: Finalización

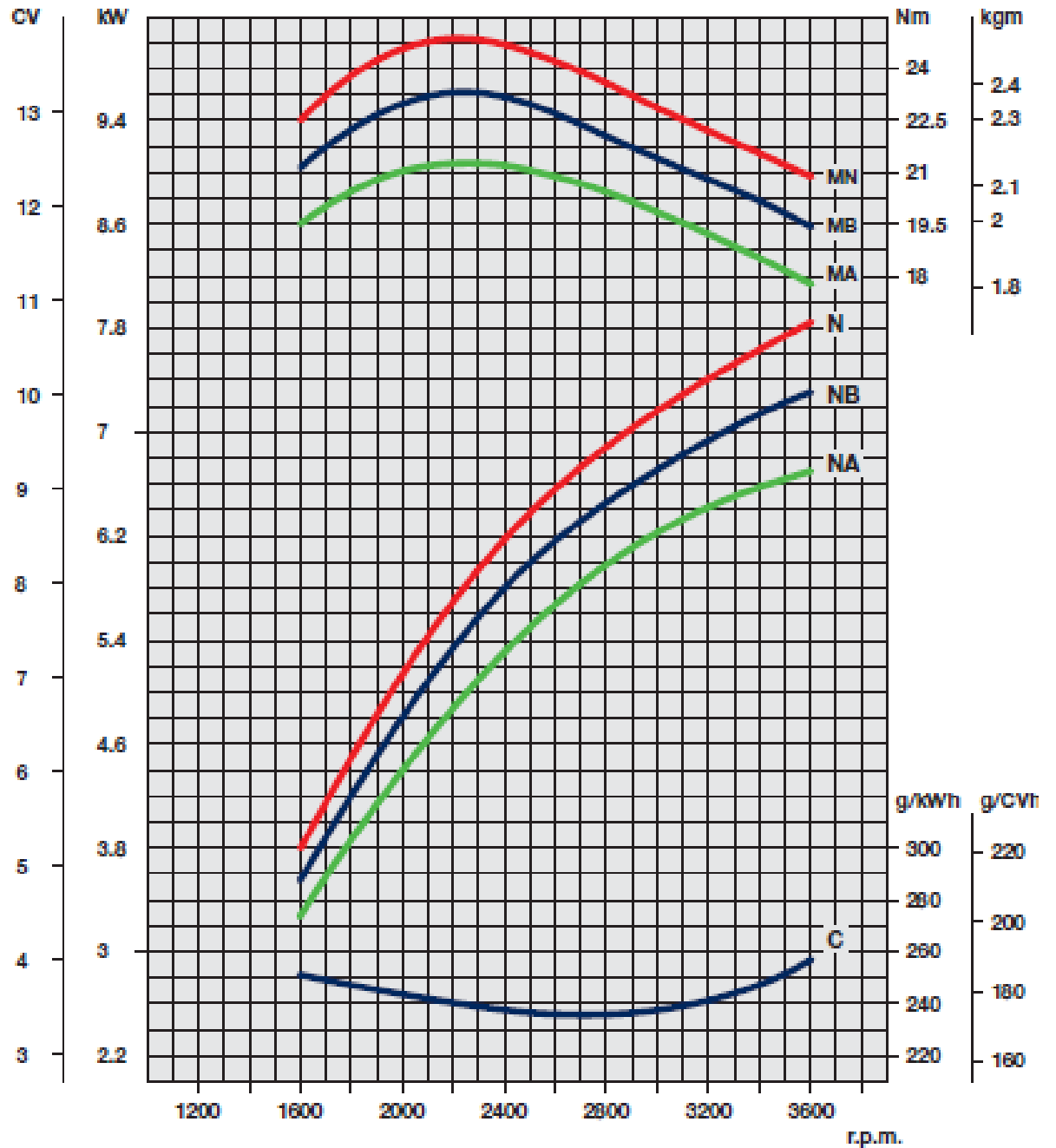
14. Purga del combustible y limpieza del tanque.
15. Desenergización de los equipos.
16. Cambio de combustible (para volver a empezar) o finalización del proceso.

**ANEXO E**  
**Especificaciones del motor diesel RY 110**

Cilindros	N.	1
Desplazamiento	cm <sup>3</sup>	442
Diámetro	mm	86
Carrera	mm	76
Relación de compresión		20.3:1
Clasificación	N (80/1269/CEE) ISO 1585	8.1/11.0
	NB ISO 3046 IFN	7.4/10.1
	NA ISO 3046 ICXN	6.8/9.3
Max. esfuerzo de torsión	Nm	25@2200
Min. Velocidad en neutro		950÷1000
Capacidad del depósito	L	5
Consumo de petróleo	kg/h	0.0048
Capacidad de aceite del cárter	L	1.5
Min. presión de aceite admisible	bar	1÷1.5
Max. inclinación permisible para cortos períodos de operación (valores máximos)		25° (35°)
Vol. de aire necesario para la combustión correcta	L/min	635
Vol. de aire necesaria para un correcto enfriamiento	L/min	5500
Peso en seco	Kg	45
Recomendado de la batería	V/Ah	12-44
Mínimos diámetros de las poleas de transmisión por correa		

## ANEXO F

### Curvas reportadas por el fabricante del motor diesel RY 110



N	Curva de potencia - 80/1269/CEE - ISO 1585 -
NB	Curva de potencia - ISO 3046/1 - IFN -
NA	Curva de potencia - ISO 3046/1 - ICXN -

MN	Curva de torque (Curva N)
MB (Curva B) - MA (Curva A)	
C	Consumo específico de combustible (Curva NB)

## ANEXO G

### Tablas de datos obtenidos durante las pruebas mecánicas en motor diesel

Prueba # 1 Combustible: DIESEL						
PORCENTAJE ACCELERACION	APERTURA VÁLVULA	VELOCIDAD [RPM]	Masa <sub>inicial</sub> [g]	Masa <sub>final</sub> [g]	FUERZA [lb]	OPACIDAD [%]
25%	20%	1748	2255	2225	104,62	64
		1754			103,9	
		1754			103,78	
	40%	1796	2496,3	2451,3	106,68	70
		1792			107,18	
		1795			107,1	
	60%	1799	2563,6	2522,3	106,8	58
		1795			106,64	
		1800			106,94	
	80%	1797	2463,2	2438,1	107,2	55
		1800			107,16	
		1799			107,12	
	100%	1288	2530,4	2503,7	106,38	60
		1290			107,12	
		1201			107,18	
50%	20%	2415	2342	2296,3	109,86	70
		2533			109,84	
		2453			109,12	
	40%	2177	2604	2560,1	108,22	64
		2176			108,24	
		2180			108,32	
	60%	2172	2704,5	2645,2	108,58	60
		2175			108,5	
		2175			108,4	
	80%	2178	2653,1	2615,7	108,3	60
		2180			108,16	
		2174			108,06	
	100%	1799	1985,2	1942,2	106,68	66
		1799			106,78	
		1802			106,82	



PORCENTAJE ACCELERACION	APERTUR A VÁLVULA	VELOCIDAD [RPM]	Masa <sub>inicial</sub> [g]	Masa <sub>final</sub> [g]	FUERZA [lb]	OPACIDAD [%]
75%	20%	3112	1763	1698	108,9	60
		3114			109,32	
		3112			109,36	
	40%	2794	1560,8	1467,9	107,1	62
		2810			107,08	
		2817			107,24	
	60%	2287	2418	2309,4	109,74	67
		2269			109,71	
		2290			109,8	
	80%	3083	2195,4	2109,5	106,48	64
		3160			107,1	
		3107			107,28	
	100%	2611	1940	1860	107,14	64
		2613			106,46	
		2611			106,4	

Prueba # 2 Combustible: DIESEL						
PORCENTAJE ACCELERACION	APERTURA VÁLVULA	VELOCIDAD [RPM]	Masa <sub>inicial</sub> [g]	Masa <sub>final</sub> [g]	FUERZA [lb]	OPACIDAD [%]
25%	20%	1762	1773,2	1743,6	109,22	62
		1789			108,76	
		1755			108,96	
	40%	1722	1994,9	1942,6	106,76	62
		1755			106,6	
		1757			106,3	
	60%	1771	1726,7	1666,4	107,06	78
		1682			106,8	
		1678			107,16	
	80%	1833	1654	1638	106,8	68
		1836			106,6	
		1808			106,74	
	100%	1236	1876,1	1804,1	106,76	82
		1379			107,12	
		1303			106,5	

PORCENTAJE ACELERACION	APERTURA VÁLVULA	VELOCIDAD [RPM]	Masa <sub>inicial</sub> [g]	Masa <sub>final</sub> [g]	FUERZA [lb]	OPACIDAD [%]
50%	20%	2165	2304,5	2228,6	105,94	66
		2659			105,85	
		2656			106,28	
	40%	2228	2455,3	2394,4	107,8	68
		2264			107,88	
		2226			107,99	
	60%	2162	2727,5	2652	107,82	68
		2155			107,9	
		2159			107,94	
	80%	2169	2515,7	2480,2	106,58	70
		2171			106,08	
		2175			105,96	
	100%	1759	2400,1	2324,9	106,68	82
		1745			107,3	
		1725			106,7	
75%	20%	3109	2503,7	2419,2	108,54	66
		3052			108,58	
		3101			108,4	
	40%	2774	1837,6	1762	106,87	64
		2764			107,02	
		2767			106,76	
	60%	2333	2614,5	2522,4	108,98	72
		2346			108,88	
		2341			108,82	
	80%	3097	2106,1	2021	105,78	76
		3094			105,38	
		3095			105,42	
	100%	2636	1737,3	1659	106,24	84
		2668			106,36	
		2666			106,32	

Prueba # 1 Combustible: BIODIESEL						
PORCENTAJE ACCELERACION	APERTURA VÁLVULA	VELOCIDAD [RPM]	Masa <sub>inicial</sub> [g]	Masa <sub>final</sub> [g]	FUERZA [lb]	OPACIDAD [%]
25%	20%	1762	2218	2189,3	103,76	50
		1763			104,42	
		1762			104,74	
	40%	1736	2183,5	2148,3	104,6	50
		1730			104,24	
		1728			104,1	
	60%	1696	1889,7	1872,6	104,36	50
		1690			104,44	
		1687			104,52	
	80%	1663	2130	2040,4	107,5	50
		1636			107,4	
		1664			106,76	
	100%	1665	1864	1821,8	108,88	64
		1740			109,26	
		1740			109,25	
50%	20%	1620	2162,6	2116,5	105,22	50
		1612			105,48	
		1618			105,41	
	40%	1296	2271,2	2192	106,3	52
		1225			106,7	
		1280			106,54	
	60%	1255	2339,1	2277,6	105,8	52
		1224			105,52	
		1210			105,5	
	80%	1240	1532	1483,4	107,9	60
		1184			106,58	
		1190			106,92	
	100%	1300	1717,8	1686,6	108,8	65
		1250			109,28	
		1260			109,26	

<b>PORCENTAJE ACCELERACION</b>	<b>APERTURA VÁLVULA</b>	<b>VELOCIDAD [RPM]</b>	<b>Masa<sub>inicial</sub> [g]</b>	<b>Masa<sub>final</sub> [g]</b>	<b>FUERZA [lb]</b>	<b>OPACIDAD [%]</b>
<b>75%</b>	<b>20%</b>	1231	2053,6	1991,4	106,5	50
		1240			106,2	
		1238			106,34	
	<b>40%</b>	1210	1859,1	1785,5	107,4	54
		1230			107,28	
		1250			107,2	
	<b>60%</b>	1206	1954,3	1873,2	105,78	60
		1215			105,8	
		1180			105,5	
	<b>80%</b>	1220	2050	1971,2	107,64	62
		1210			107,3	
		1190			106,88	
	<b>100%</b>	1268	2143,1	2067,4	109,2	63
		1270			109,5	
		1257			109,32	

<b>Prueba # 2 Combustible: BIODIESEL</b>						
<b>PORCENTAJE ACCELERACION</b>	<b>APERTURA VÁLVULA</b>	<b>VELOCIDAD [RPM]</b>	<b>Masa<sub>inicial</sub> [g]</b>	<b>Masa<sub>final</sub> [g]</b>	<b>FUERZA [lb]</b>	<b>OPACIDAD [%]</b>
<b>25%</b>	<b>20%</b>	1762	2250,5	2214,8	104,36	40
		1757			104,58	
		1760			104,64	
	<b>40%</b>	1544	2612,2	2579,4	104,58	50
		1625			104,3	
		1701			104,5	
	<b>60%</b>	1650	2476,8	2450,4	104,5	62
		1670			104,58	
		1710			104,56	
	<b>80%</b>	1633	2341,3	2263,7	107,3	60
		1623			107,1	
		1631			107	
	<b>100%</b>	1659	2070	2016,4	109,15	62
		1677			109,44	
		1623			109,2	

<b>PORCENTAJE ACELERACION</b>	<b>APERTURA VÁLVULA</b>	<b>VELOCIDAD [RPM]</b>	<b>Masa<sub>inicial</sub> [g]</b>	<b>Masa<sub>final</sub> [g]</b>	<b>FUERZA [lb]</b>	<b>OPACIDAD [%]</b>
<b>50%</b>	<b>20%</b>	1620	2147	2087,9	105,6	56
		1619			105,58	
		1621			105,56	
	<b>40%</b>	1254	1943,9	1875,3	106,8	50
		1277			106,67	
		1260			106,68	
	<b>60%</b>	1247	2198,6	2157,5	105,76	54
		1274			105,62	
		1270			105,65	
	<b>80%</b>	1296	1857,1	1800,9	108,2	50
		1294			107,54	
		1298			107,36	
	<b>100%</b>	1293	2438,3	2366	109,16	66
		1329			109,1	
		1334			108,96	
<b>75%</b>	<b>20%</b>	1241	2006,5	1929,1	106,32	58
		1237			106,32	
		1237			106,28	
	<b>40%</b>	1241	2194,4	2118	107,56	58
		1203			107,32	
		1238			107,44	
	<b>60%</b>	1152	1914,5	1851	105,8	60
		1114			105,6	
		1129			105,5	
	<b>80%</b>	1186	2099,9	2017,6	106,7	64
		1241			106,92	
		1215			107	
	<b>100%</b>	1270	1782,7	1693,1	109,5	66
		1255			109,5	
		1239			109,23	

## ANEXO H

### Tablas de resultados de las pruebas mecánicas en motor diesel

Resultados prueba # 1 Combustible: DIESEL								
PORCENTAJE ACCELERACION	APERTURA VÁLVULA	VELOCIDAD [RPM]	TORQUE [N-m]	POTENCIA [kW]	POTENCIA CORREGIDA [kW]	CONSUMO COMBUSTIBLE [g]	SFC [g/kWh]	OPACIDAD [%]
25%	20%	1751,0	14,4	2,65	2,75	30	108,88	64
	40%	1795,5	14,8	2,79	2,89	45	155,26	70
	60%	1799,5	14,8	2,79	2,90	41,3	142,21	58
	80%	1798,0	14,9	2,80	2,90	25,1	86,26	55
	100%	1244,5	14,8	1,93	2,00	26,7	133,05	60
50%	20%	2434,0	15,2	3,87	4,01	45,7	113,55	70
	40%	2178,5	15,0	3,42	3,55	43,9	123,25	64
	60%	2173,5	15,0	3,42	3,55	59,3	166,53	60
	80%	2176,0	15,0	3,42	3,55	37,4	105,21	60
	100%	1800,5	14,8	2,79	2,89	43	148,14	66
75%	20%	3112,0	15,1	4,93	5,11	65	126,74	60
	40%	2805,5	14,8	4,36	4,53	92,9	204,70	62
	60%	2288,5	14,8	3,55	3,82	108,6	283,29	67
	80%	3095,0	15,0	4,87	5,06	85,9	169,40	64
	100%	2611,0	15,0	4,11	4,27	80	186,98	64

Resultados prueba # 2 Combustible: DIESEL								
PORCENTAJE ACCELERACION	APERTURA VÁLVULA	VELOCIDAD [RPM]	TORQUE [N-m]	POTENCIA [kW]	POTENCIA CORREGIDA [kW]	CONSUMO COMBUSTIBLE [g]	SFC [g/kWh]	OPACIDAD [%]
25%	20%	1758,5	15,1	2,78	2,89	29,6	102,17	62
	40%	1739,5	14,8	2,69	2,79	52,3	186,89	62
	60%	1724,5	14,8	2,68	2,78	60,3	216,17	78
	80%	1820,5	14,8	2,82	2,93	16	54,51	68
	100%	1269,5	14,8	1,96	2,24	72	320,66	82
50%	20%	2410,5	14,7	3,71	3,85	75,9	196,50	66
	40%	2227,0	15,0	3,49	3,62	60,9	167,83	68
	60%	2160,5	15,0	3,38	3,51	75,5	214,50	68
	80%	2172,0	14,7	3,35	3,48	35,5	101,84	70
	100%	1742,0	14,8	2,70	2,83	75,2	264,66	82
75%	20%	3105,0	15,0	4,89	5,07	84,5	166,14	66
	40%	2770,5	14,8	4,30	4,46	75,6	168,98	64
	60%	2337,0	14,8	3,62	3,75	92,1	244,74	72
	80%	3096,0	14,8	4,79	4,97	85,1	170,86	76
	100%	2651,0	14,7	4,09	4,24	78,3	184,21	84

Resultados prueba # 1 Combustible: BIODIESEL								
PORCENTAJE ACCELERACION	APERTURA VÁLVULA	VELOCIDAD [RPM]	TORQUE [N-m]	POTENCIA [kW]	POTENCIA CORREGIDA [kW]	CONSUMO COMBUSTIBLE [g]	SFC [g/kWh]	OPACIDAD [%]
25%	20%	1762,0	14,4	2,67	2,77	28,7	103,46	50
	40%	1732,0	14,5	2,62	2,72	35,2	128,97	50
	60%	1691,5	14,5	2,56	2,66	17,1	64,10	50
	80%	1663,5	14,8	2,59	2,90	89,6	308,36	50
	100%	1702,5	15,1	2,69	2,80	42,2	150,49	64
50%	20%	1619,0	14,6	2,47	2,57	46,1	179,04	50
	40%	1288,0	14,7	1,99	2,33	79,2	338,47	52
	60%	1232,5	14,6	1,89	2,07	61,5	296,67	52
	80%	1215,0	14,9	1,89	1,97	48,6	246,60	60
	100%	1280,0	15,1	2,03	2,10	31,2	148,04	65
75%	20%	1234,5	14,7	1,91	2,09	62,2	296,52	50
	40%	1230,0	15,0	1,93	2,24	73,6	327,77	54
	60%	1193,0	15,1	1,89	2,30	81,1	351,12	60
	80%	1205,0	14,9	1,88	2,25	78,8	348,91	62
	100%	1262,5	14,9	1,97	2,29	75,7	330,17	63

Resultados prueba # 2 Combustible: BIODIESEL								
PORCENTAJE ACCELERACION	APERTURA VÁLVULA	VELOCIDAD [RPM]	TORQUE [N-m]	POTENCIA [kW]	POTENCIA CORREGIDA [kW]	CONSUMO COMBUSTIBLE [g]	SFC [g/kWh]	OPACIDAD [%]
25%	20%	1761,0	14,5	2,67	2,77	35,7	128,46	40
	40%	1622,5	14,5	2,46	2,55	32,8	128,05	50
	60%	1680,0	14,5	2,55	2,64	26,4	99,55	62
	80%	1632,0	14,9	2,54	2,74	77,6	282,71	60
	100%	1641,0	15,1	2,60	2,70	53,6	198,11	62
50%	20%	1620,5	14,6	2,48	2,58	59,1	228,74	56
	40%	1257,0	14,8	1,95	2,19	68,6	312,24	50
	60%	1258,5	14,7	1,93	2,00	41,1	204,58	54
	80%	1297,0	14,9	2,03	2,13	56,2	262,71	60
	100%	1313,5	15,1	2,08	2,35	72,3	307,35	66
75%	20%	1239,0	14,7	1,91	2,26	77,4	342,22	58
	40%	1239,5	15,0	1,95	2,29	76,4	333,34	58
	60%	1140,5	15,1	1,81	2,05	63,5	309,38	60
	80%	1200,5	14,9	1,87	2,29	82,3	357,94	64
	100%	1254,5	14,9	1,96	2,43	89,6	366,97	66

